

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Avaliação da Utilização do Anel Intermédio e da
Inclinação das Barras na Gaiola do Motor de
Indução Trifásico**

Marcelo Dias da Silva

VERSÃO FINAL

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientador: Professor Doutor Carlos Manuel de Araújo Sá
Co-orientador: Professor Doutor Hugo Armando Dominguez Almaguer

31/08/2018

© Marcelo Dias da Silva, 2018

Em memória do meu avô Jorge e do meu avô João

Resumo

O desempenho de um motor de indução depende do desenho da gaiola de esquilo do rotor que lhe pertence. As alterações no desempenho incluem variações nas grandezas elétricas em regime permanente, alterações na curva de binário para diferentes velocidades de rotação e alterações na produção de ruído e vibrações.

A inclinação das barras e a introdução do anel intermédio são dois fatores utilizados atualmente no desenho da gaiola de esquilo do rotor. Estas soluções têm como objetivo reduzir a presença de harmónicos no fluxo magnético no entreferro do motor. No entanto, a introdução destas soluções tende a piorar o desempenho do motor no que se refere ao rendimento do mesmo e, por vezes, à curva de binário.

Nesta dissertação é explorada a influência dos dois fatores no desenho da gaiola de esquilo do rotor de motores de indução. Faz-se comparações entre rotores sem nenhuma destas soluções com rotores que utilizam apenas uma ou ambas as soluções. A comparação é suportada por resultados obtidos por simulações numéricas realizadas em *software* baseado no método de elementos finitos e obtidos por ensaios laboratoriais.

O trabalho conducente à elaboração da presente dissertação foi realizado pelo autor no Departamento de Pesquisa e Inovação Tecnológica da empresa WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS - MOTORES S.A., localizada em Jaraguá do Sul (SC/Brasil), no período abril/setembro de 2018, ao abrigo do programa de intercâmbio MOBILE envolvendo a FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, a FURB - Fundação Universidade de Blumenau e a WEG. Contou com a orientação do professor doutor Carlos Manuel de Araújo Sá, a supervisão do engenheiro Hugo Gustavo Gomez Mello (WEG) e com a orientação local do professor Hugo Armando Dominguez Almaguer (FURB).

Abstract

The performance of an induction motor depends on the design of the rotor squirrel cage that is part of it. The changes in the performance can include variations on the RMS value of the electrical parameters in the steady state, differences in the torque vs. rotation speed curve and variations in the production of noises and vibrations.

The skewed conductors and the introduction of the middle ring are two variants in the design of the rotor squirrel cage used nowadays. These solutions have the objective of reducing the presence of harmonics in the magnetic flux on the air gap of the motor. However, the introduction of these solutions tends to decline the quality of the motor performance regarding efficiency and, sometimes, the torque vs. rotation speed curve.

In this dissertation, it is analyzed the influence of these two variations of the rotor squirrel cage. It is intended to make comparisons between rotors that do not use any of these variations and rotors that use only one or both of these variations. These comparisons are supported by results obtained by numerical simulations calculated in the Finite Element Method based software and results obtained by laboratory tests.

The work developed regarding the present dissertation it was done by the author in the Research and Technological Innovation Department of WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS - MOTORES S.A., located in Jaraguá do Sul (SC/Brasil), between April and September of 2018, under the student exchange program MOBILE involving FEUP - Faculty of Engineering of the University of Porto, FURB - Foundation University of Blumenau and WEG. The work it was supervised by Prof. Carlos Manuel de Araújo Sá (FEUP), Eng. Hugo Gustavo Gomez Mello (WEG) and by the local professor Prof. Hugo Armando Dominguez Almaguer (FURB).

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Professor Carlos Manuel de Araújo Sá por sempre ter demonstrado apoio total em relação ao desenvolvimento da dissertação e à vida académica em geral. Agradeço também a exigência que demonstrou desde as primeiras aulas de Máquinas Elétricas, pois foi aí que nasceu o meu interesse por esta área da Engenharia Eletrotécnica.

Gostaria também de agradecer ao Eng. Daniel Schmitz que me orientou de uma forma incansável e paciente por entre as várias secções da WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A. Sem a sua ajuda o desenvolvimento prático necessário para a completude da dissertação teria sido praticamente impossível.

Quero agradecer ao Gestor do Departamento Sebastião Lauro Nau e ao Chefe de Secção Hugo Gustavo Gomez Mello pela oportunidade de desenvolver a dissertação de mestrado no departamento de Pesquisa de Inovação Tecnológica da empresa WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS - MOTORES S.A. e por garantirem que o meu trabalho tivesse todo o suporte necessário. Não posso deixar de agradecer também ao Eng. Bruno Ricardo Oliveira Baptista pois foi um ponto de contacto importante com a WEGEuro e pela sua disponibilidade constante para ajudar e esclarecer as dúvidas que surgiram no desenvolvimento da dissertação.

Agradeço também à Fundação Universidade de Blumenau, mais especificamente ao Professor Hugo Armando Dominguez Almaguer e ao Professor Sérgio Henrique Lopes Cabral pela sua disponibilidade para colaborar e ajudar sempre que foi necessário.

Não posso deixar de mencionar o apoio que senti por parte das pessoas que constituem a equipa do Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento de Inovação Tecnológica, pois a sua amizade e apoio foram bastante importantes durante os meses que passei no Brasil.

Gostaria de agradecer à família Franke por me terem acolhido de forma calorosa na sua casa durante a minha estadia em Jaraguá do Sul.

Não posso deixar de agradecer aos meus amigos que muitas vezes me ajudaram mesmo não tendo consciência que o estavam a fazer. As nossas conversas bem dispostas e leves em muito contribuíram para que os dias mais difíceis não fossem totalmente sombrios.

Quero também agradecer à minha família pelas mensagens espontâneas de apoio e declarações esporádicas de saudades. Por último queria agradecer da forma mais sincera e calorosa que me é possível aos meus pais e à minha irmã por sempre estarem do outro lado do telefone disponíveis para me ouvir e por terem sempre à disposição palavras de conforto e apoio mesmo quando o meu bom humor era raro.

Índice

Resumo	v
Abstract.....	vii
Agradecimentos	ix
Índice	xi
Lista de figuras	xiii
Lista de tabelas	xvi
Abreviaturas e Símbolos	xvii
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1. Motivação	2
1.2. Objetivos da Dissertação	2
1.3. Descrição dos Capítulos da Dissertação	3
Capítulo 2	5
Desenvolvimento Teórico.....	5
2.1. Aplicação dos Motores de Indução	5
2.2. Soluções Industriais de Rotor	7
2.3. Revisão da Literatura Técnica	9
2.4. Circuito Equivalente do Motor	12
Capítulo 3	15
Desenvolvimento Prático	15
3.1. Justificação do Motor Escolhido	15
3.2. Simulações Numéricas e Algumas Considerações	17
3.3. Ensaios Laboratoriais	26
3.4. Rotores Usados nos Estudos	28
Capítulo 4	35
Resultados das Simulações Numéricas	35
4.1. Apresentação Sumária de Resultados	35
4.2. Influência da Inclinação das Barras	36
4.3. Considerações Finais em relação à Inclinação das Barras	40
4.4. Notas sobre os resultados das Simulações Numéricas	40
Capítulo 5	43
Resultados Laboratoriais.....	43
5.1. Preparação e Construção de Protótipos	43
5.2. Apresentação Sumária dos Resultados	45

5.3. Comparação dos Resultados Laboratoriais com os Resultados das Simulações Numéricas	47
5.4. Análise dos Resultados dos Ensaios Laboratoriais	51
5.5. Considerações Finais em Relação à Inclinação das Barras.....	64
5.6. Considerações Finais em Relação ao Uso do Anel Intermédio	64
Capítulo 6	67
Conclusões	67
6.1. Conclusões	67
6.2. Propostas para Trabalhos Futuros	68
Referências	71
Anexo A - Ensaio de Ruído	73
Anexo B - Ensaio de Vibração	77

Lista de figuras

Figura 2.1 - Escovas e anéis coletores de um motor de indução com rotor bobinado [3]	6
Figura 2.2 - Segmento do catálogo de empresa que fabrica motores de indução [4]	7
Figura 2.3 - Ilustração de um rotor com barras inclinadas sem anel intermédio [Fonte: Autor].....	8
Figura 2.4 - Ilustração de um rotor com barras inclinadas com anel intermédio [Fonte: Autor].....	9
Figura 2.5 - Solução proposta por Carl E. Johnson [12]	11
Figura 2.6 - Solução proposta por Hans Lund [13]	11
Figura 2.7 - Solução proposta por Vilém Klíma [14]	12
Figura 2.8 - Solução proposta por Philip L. Alger [15]	12
Figura 2.9 - Circuito equivalente do motor [16].....	13
Figura 3.1 - Motor escolhido para a realização do estudo [17]	16
Figura 3.2 - Malha utilizada na simulação de um modelo 2D [Fonte: Autor].....	18
Figura 3.3 - Binário em função do número de pontos de amostragem	20
Figura 3.4 - Perdas no ferro em função do número de pontos de amostragem.....	21
Figura 3.5 - Perdas Joule no Rotor em função do número de pontos de amostragem.....	21
Figura 3.6 - Tempo da simulação em função do número de pontos de amostragem	22
Figura 3.7 - Exemplo de malha de baixa qualidade [Fonte: Autor]	23
Figura 3.8 - Exemplo de malha de boa qualidade [Fonte: Autor]	23
Figura 3.9 - Diferença entre as malhas em diferentes regiões do modelo [Fonte: Autor]	23
Figura 3.10 - Esquema do ensaio de vibração e ruído em carga [Fonte: Autor]	28
Figura 3.11 - Rotor com barras direitas sem anel intermédio [Fonte: Autor].....	29
Figura 3.12 - Rotor com barras direitas com anel intermédio [Fonte: Autor]	30
Figura 3.13 - Anel intermédio [Fonte: Autor].....	31

Figura 3.14 - Distribuição da corrente no anel intermédio de um rotor com barras direitas [Fonte: Autor]	31
Figura 3.15 - Ângulos nos rotores de barras inclinadas [20]	32
Figura 3.16 - Ângulo de Desfasamento das Barras [Fonte: Autor].....	33
Figura 4.1 - Conteúdo harmónico das correntes estatóricas do motor com o rotor 1 (barras inclinadas sem anel intermédio)	38
Figura 4.2 - Conteúdo harmónico das correntes estatóricas do motor com o rotor 2 (barras direitas sem anel intermédio)	38
Figura 4.3 - Zoom do espectro do conteúdo harmónico das correntes estatóricas do motor com o rotor 1 (barras inclinadas sem anel intermédio) e do rotor 2 (barras direitas sem anel intermédio).....	38
Figura 4.4 - Amplitude do campo magnético no rotor 2 (barras direitas sem anel intermédio) [Fonte: Autor]	39
Figura 4.5 - Amplitude do campo magnético no rotor 1 (barras inclinadas sem anel intermédio).....	39
Figura 5.1 - Chapa do anel intermédio [Fonte: Autor]	44
Figura 5.2 - Chapa utilizada no restante pacote [Fonte: Autor]	44
Figura 5.3 - Rotores construídos e ensaiados. Rotores 1, 2, 3 e 4 (da esquerda para a direita) [Fonte: Autor]	45
Figura 5.4 - Elevação de temperatura (esquerda) e rendimento (direita) dos ensaios laboratoriais dos rotores 1 e 2	48
Figura 5.5 - Velocidade de rotação dos ensaios e simulações dos rotores 1 e 2.....	48
Figura 5.6 - Perdas por efeito de Joule (fundamental) dos rotores 1 e 2	49
Figura 5.7 - Correntes por fase estatórica nos ensaios e simulações dos rotores 1 e 2	50
Figura 5.8 - Perdas por efeito de Joule nos ensaios e simulações dos rotores 1 e 2.....	50
Figura 5.9 - Perdas no ferro nos ensaios e simulações dos rotores 1 e 2	50
Figura 5.10 - Velocidade de rotação dos vários rotores para a carga estipulada	52
Figura 5.11 - Perdas por efeito de Joule no rotor provocadas pela componente fundamental da corrente	53
Figura 5.12 - Corrente por fase no estator nos ensaios dos vários rotores	54
Figura 5.13 - Perdas de Joule no estator nos ensaios dos vários rotores	54
Figura 5.14 - Perdas no ferro do motor nos ensaios dos vários rotores	55
Figura 5.15 - Perdas mecânicas do motor nos ensaios dos vários rotores	56
Figura 5.16 - Perdas suplementares do motor nos ensaios dos vários rotores	56
Figura 5.17 - Perdas totais do motor nos ensaios dos vários rotores	57

Figura 5.18 - Elevação de temperatura do motor nos ensaios dos vários rotores	57
Figura 5.19 - Rendimento do motor nos ensaios dos vários rotores.....	58
Figura 5.20 - Fator de potência do motor nos ensaios dos vários rotores	59
Figura 5.21 - Curva de binário desenvolvido versus a velocidade de rotação nos ensaios dos vários rotores	60
Figura 5.22 - Resultados do ensaio de vibração produzida pelos vários rotores.....	61
Figura 5.23 - Resultados do ensaio de ruído (média das 3 posições consideradas) produzido pelos vários rotores	62
Figura A.1 - Esquema do ensaio laboratorial de ruído	73
Figura B.1 - Posição da sonda no ponto referido como 'horizontal' [Fonte: Autor]	77
Figura B.2 - Posição da sonda no ponto referido como 'vertical' [Fonte: Autor]	78

Lista de tabelas

Tabela 3.1 - Períodos de amostragem	19
Tabela 3.2 - Resultados obtidos através da variação do período de amostragem	20
Tabela 3.3 - Características da máquina utilizada no cálculo das simulações.....	24
Tabela 3.4 - Numeração dos rotores	30
Tabela 4.1 - Resumo dos resultados das simulações numéricas	35
Tabela 5.1 - Resumo dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais (ensaio de tipo)	45
Tabela 5.2 - Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de ruído (em carga).....	46
Tabela 5.3 - Resultados obtidos nos ensaios de vibração (em carga)	46
Tabela 5.4 - Ruído com origem eletromagnética produzido pelos vários rotores.....	63
Tabela A.1 - Médias do ruído produzido pelo motor durante o ensaio	74
Tabela A.2 - Ruído com origem eletromagnética produzido pelo motor com os diferentes rotores	74
Tabela A.3 - Corrente estatórica por fase no ensaio de ruído.....	75
Tabela B.1 - Corrente estatórica por fase no ensaio de Vibração	78

Abreviaturas e Símbolos

Lista de símbolos

\underline{U}	tensão de alimentação de uma fase do motor (V)
R_1	resistência dos enrolamentos de cobre que se encontram no estator (Ω)
x_1	reatância de fugas por fase dos enrolamentos de cobre que se encontram no estator (Ω)
R_0	resistência representativa das perdas no ferro do motor (Ω)
X_m	reatância que modeliza o fluxo magnético comum do motor (Ω)
R_2	resistência equivalente do rotor (Ω)
x_2	reatância de fugas por fase equivalente do rotor (Ω)
s	deslizamento do motor (%)
p	polos do motor elétrico
Y	ligação em estrela do motor elétrico
Δ	ligação em triângulo do motor elétrico

Capítulo 1

Introdução

Entre os vários tipos de motores disponíveis no mercado, o motor de indução destaca-se como o mais amplamente utilizado devido às suas vantagens nas áreas de custo e de robustez. A possibilidade de recorrer à injeção de alumínio no processo de fabrico dos rotores baixa significativamente o preço destes motores elétricos, tornando-os competitivos no panorama dos motores disponíveis comercialmente. Para além disso, a ausência de qualquer sistema coletor-escovas na variante dos motores de indução de rotor em gaiola, e de enrolamentos isolados nesse mesmo rotor, contribuem decisivamente para a sua robustez acrescida, o que confere longos períodos de funcionamento sem qualquer tipo de manutenção.

A vantagem económica que os motores de indução têm sobre as restantes tecnologias de motores depende fortemente da capacidade industrial de os produzir em série, de uma forma rápida e com processos automatizados, seja na inserção das bobinas estatóricas, seja na injeção dos rotores com alumínio.

O processo de injeção dos rotores é constituído por várias fases. A primeira delas é a construção do pacote das chapas metálicas do rotor, na qual será definido o formato da gaiola de esquilo. Devido à necessidade de rapidez e automação do processo, o formato da gaiola produzida deverá corresponder a uma solução que contrabalance a facilidade de processo construtivo e o comportamento desejado para o motor.

Uma vez que os motores de indução são amplamente utilizados nas mais diversas áreas, os requisitos adicionais que estes têm que respeitar são os mais diversos, desde um limite máximo para o ruído produzido até à garantia de um funcionamento seguro em ambientes explosivos. Alguns destes requisitos poderão ser alcançados com algumas alterações no desenho e constituição da gaiola de esquilo do rotor.

1.1. Motivação

Sabendo que o formato da gaiola de esquilo do rotor tem influência no comportamento do motor, é de interesse geral verificar de que modos as alterações nesta irão alterar as características do motor, assim como a magnitude dessas mesmas alterações. Uma vez que este tipo de soluções podem vir a alterar ou a tornar mais complexo o processo da sua produção industrial em série, é também de interesse geral verificar que soluções podem ser, de facto, integradas no seu processo de fabrico.

O estudo sobre a relação entre as características de desempenho do motor e o desenho da gaiola de esquilo do respetivo rotor é relevante, uma vez que as soluções técnicas encontradas poderão ser, com os devidos ajustes, aplicadas para motores com as mais variadas gamas de potência, desde os de dimensões menores (para uso comercial ou doméstico) até aos de dimensões maiores (para uso industrial).

É, portanto, um estudo que se pode aplicar a um vasto mercado de negócio responsável por fabricar a solução mais económica e fiável de produção de binário mecânico a partir da energia elétrica e que, por isso mesmo, continua a ser a mais popular atualmente.

1.2. Objetivos da Dissertação

Com o desenvolvimento desta dissertação pretende-se esclarecer quais são exatamente os efeitos da eventual introdução de um anel condutor intermédio num qualquer rotor composto por barras condutoras postas normalmente em curto-circuito por apenas dois anéis localizados nos extremos do pacote de chapas magnéticas e perceber quais os cuidados a ter no dimensionamento desse mesmo anel intermédio para um determinado rotor, tendo em conta o volume total de alumínio do anel intermédio, bem como também a secção transversal do mesmo.

Adicionalmente, também se pretende analisar os efeitos da inclinação das barras condutoras das gaiolas em rotores dotados com e sem anel intermédio.

Existe alguma bibliografia teórica que prevê os efeitos destas alterações [1] [2]. No entanto, o objetivo desta dissertação é confirmar essas previsões através de simulações feitas através de *software* baseado no Método de Elementos Finitos e, posteriormente através de ensaios laboratoriais de um motor com as diferentes variantes de rotor.

Pretende-se, principalmente, avaliar grandezas como a vibração, o ruído, os harmónicos do fluxo no entreferro do motor, as perdas no rotor e as variações na curva de binário.

1.3. Descrição dos Capítulos da Dissertação

A presente dissertação está estruturada em seis capítulos.

O ‘Capítulo 1 - Introdução’ tem como função contextualizar o tema, enunciar os objetivos da dissertação e justificar o trabalho desenvolvido.

No ‘Capítulo 2 - Desenvolvimento Teórico’ é apresentado, num plano geral o campo de aplicação dos motores de indução de rotor em gaiola, com particular ênfase nos dotados com anel intermédio ou equivalente e são descritas sucintamente as soluções industriais comercializadas atualmente. Também é feito um levantamento da literatura técnica sobre a influência do anel intermédio nos rotores dos motores de indução.

No ‘Capítulo 3 - Desenvolvimento Prático’ são descritas algumas opções tomadas para a realização das simulações numéricas e dos ensaios laboratoriais, assim como o método numérico em que o *software* utilizado se baseia e os procedimentos laboratoriais realizados. Por fim, são ainda descritos os rotores considerados na dissertação.

No ‘Capítulo 4 - Resultados das Simulações Numéricas’ são apresentados os resultados das simulações feitas sobre os rotores sem anel intermédio. A discussão sobre a comparação entre os resultados das simulações e as previsões feitas na bibliografia técnica é realizada neste capítulo.

No ‘Capítulo 5 - Resultados Laboratoriais’ é feita a apresentação dos resultados obtidos através dos ensaios laboratoriais. É realizada também uma comparação final entre estes resultados laboratoriais, as previsões da literatura técnica e os resultados das simulações levadas a cabo.

No ‘Capítulo 6 - Conclusões’ são expressas as conclusões finais da dissertação, assim como as propostas para trabalhos futuros que a complementem.

Capítulo 2

Desenvolvimento Teórico

Neste capítulo é explanada toda a fundamentação teórica e todas as soluções que são conhecidas pelo autor e que são utilizadas industrialmente no que diz respeito a rotores injetados de motores de indução. A fundamentação teórica será baseada na revisão bibliográfica de alguns artigos científicos já escritos sobre o assunto, literatura técnica e patentes industriais. As soluções industriais serão descritas, assim como referenciadas as respectivas frequências de utilização. Nesta secção do trabalho procura-se expressar o estado da arte no que diz respeito aos rotores injetados, às aplicações principais para motores de indução e às soluções industriais de rotores injetados.

2.1. Aplicação dos Motores de Indução

Os motores de indução podem ser divididos em duas grandes categorias, relacionadas com o seu enrolamento rotórico. A primeira apresenta um rotor bobinado, que poderá ou não ser dotado com anéis coletores e escovas (ilustrado na fig. 2.1). As bobinas do rotor poderão encontrar-se diretamente em curto-circuito ou ligadas através de um reóstato, ou então poderão ser alimentadas através dos anéis coletores e das escovas. A segunda categoria apresenta um rotor em gaiola de esquilo, com maior simplicidade construtiva. É nos motores que pertencem a esta segunda categoria que se poderão aplicar os conhecimentos técnicos e científicos referidos na secção 2.3.

Os motores de indução com rotor em gaiola de esquilo podem ser fabricados num grande leque de gamas de potência, começando em frações de kW até aos milhares de kW. Esta grande flexibilidade na conversão eletromecânica de energia permite que o seu uso seja adequado para vários cenários, nomeadamente industrial, comercial e doméstico. Na fig. 2.2 também é possível visualizar uma das faixas dos diferentes tamanhos em que são produzidos

os motores de indução. Para além da disponibilidade dos motores de indução com rotor em gaiola de esquilo numa vasta gama de potências estipuladas, estes motores também apresentam uma alta eficiência e um custo de produção reduzido quando comparados com outras tecnologias para o fabrico de motores elétricos.

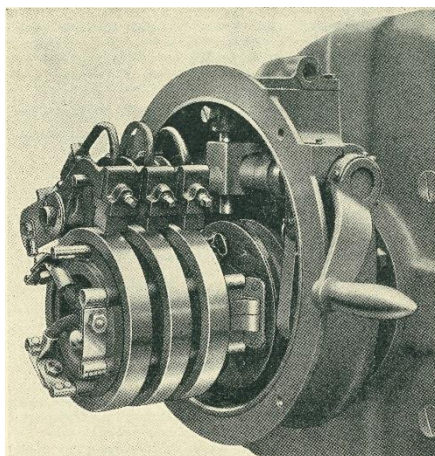


Figura 2.1 - Escovas e anéis coletores de um motor de indução com rotor bobinado [3]

O custo reduzido dos motores de indução com rotor em gaiola de esquilo deve-se, principalmente, ao facto de que os rotores podem ser fabricados através da injeção de alumínio, dispensando o processo de inserção das espiras das bobinas manualmente no núcleo magnético, como acontece nos motores com rotor bobinado. Por sua vez, a injeção de alumínio é de há muito um processo automatizado que permite a produção de rotores de uma forma rápida e a uma grande escala. O facto de, na maior parte das vezes, ser utilizado alumínio no rotor em vez de cobre também ajuda a baixar o preço. Para além destes fatores, os motores de rotor em gaiola de esquilo dispensam a utilização de escovas, o que permite uma manutenção menos intensa e mais barata.

Por outro lado, mesmo com as mencionadas vantagens dos motores com rotor em gaiola de esquilo, os motores com rotores bobinados, devido às suas características eletromecânicas, poderão ser os eleitos para aplicações cujas cargas tenham uma grande inércia ou cujo binário (resistente) no arranque seja elevado. Poderão também ser utilizados quando o sistema elétrico de alimentação apresentar sérias limitações em termos de correntes de arranque necessárias. Tais aplicações podem ser encontradas, por exemplo, na indústria mineira e na indústria metalúrgica pesada.

De entre os motores com rotor em gaiola de esquilo podem distinguir-se duas categorias, caso se tenha em conta o número de fases que alimentam o estator. Existem motores monofásicos, alimentados por uma fase, e motores trifásicos, alimentados por três fases.

Os motores de indução monofásicos ‘puros’ (um só enrolamento estatórico monofásico) não apresentam binário de arranque, tendo que se recorrer para o efeito ou a uma solução dita

de polos sombreados ou a um segundo enrolamento estatórico, também ele monofásico, dotado com um ou mais condensadores em série. Geralmente, os motores monofásicos são utilizados em aplicações de baixa potência estipulada, tais como aplicações domésticas. As aplicações mais comuns para este tipo de motores são: bombas de água, compressores, pequenas ventoinhas, brinquedos, aspiradores de pó, eletrodomésticos como máquinas de lavar e secar e pequenas ferramentas, como berbequins e serras elétricas.

Por outro lado, os motores de indução trifásicos apresentam um binário de arranque que os torna capazes de iniciarem o seu funcionamento sem a utilização de outros equipamentos ou soluções. Os motores de indução trifásicos são utilizados em aplicações de média e alta potência estipulada, em ambientes industriais e comerciais. As aplicações mais comuns para este tipo de motores são: elevadores, guindastes, exaustores de grande capacidade, moinhos utilizados na extração de petróleo, indústria têxtil, entre outros.



Figura 2.2 - Segmento do catálogo de empresa que fabrica motores de indução [4]

2.2. Soluções Industriais de Rotor

Considerando agora apenas o tipo de motor utilizado neste trabalho - motor de indução trifásico com rotor em gaiola de esquilo - é possível definir as mais variadas alternativas para o desenho do rotor. Algumas destas alternativas apresentadas em artigos científicos e patentes industriais são apresentadas na secção 2.3. No entanto, apenas algumas são seleccionadas para produção e utilização industrial.

Os critérios para a escolha dos rotores podem ser variados, mas os mais importantes estão focados no custo de produção, no desempenho real do motor e nas limitações das máquinas de produção.

2.2.1. Barras Inclinadas

A solução do rotor com barras inclinadas, ilustrada na fig. 2.3, é a mais facilmente encontrada nos motores de indução com rotor em gaiola de esquilo. A razão para isto baseia-se em dois pontos: o primeiro é que o seu fabrico é simples e rápido, bastando empilhar de forma alinhada o número de chapas magnéticas necessárias para obter o comprimento de cada pacote rotórico desejado e, de seguida, incliná-lo com um ângulo predefinido, ficando pronto para injetar; a segunda razão é que o desempenho do motor, em termos de vibrações e ruído, apesar de, teoricamente, não ser o melhor possível, já está num nível aceitável, tornando esta solução bastante boa no que diz respeito à relação qualidade/preço.

No entanto, para soluções em que o critério relativo a perdas, vibrações ou ruído seja prioritário, esta solução poderá ser insuficiente.

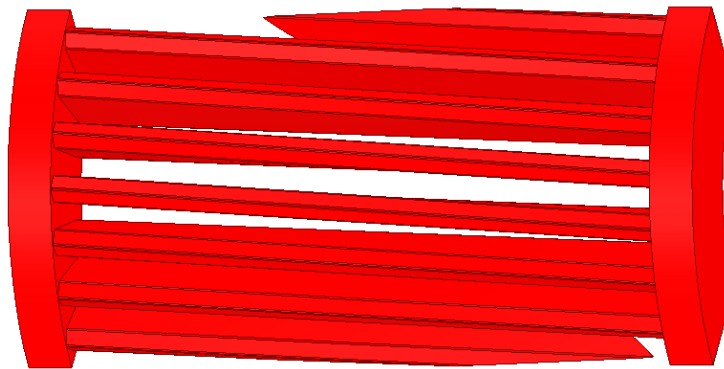


Figura 2.3 - Ilustração de um rotor com barras inclinadas sem anel intermédio [Fonte: Autor]

2.2.2. Rotor com Barras Inclinadas com Anel Intermédio

Os casos em que se utilizou este tipo de solução num produto comercial são bastantes raros. No entanto, existem empresas que a utilizam na sua linha de motores de indução de alto rendimento [5]. A utilização deste rotor para esta aplicação em particular faz sentido segundo a literatura teórica. Apesar de a curto prazo estes motores não conseguirem competir em termos de preço: a empresa em questão apenas defende que durante a vida útil do motor o seu custo total (de aquisição e de funcionamento) irá ser menor quando comparado com o de um motor com um índice de rendimento convencional.

O rotor aqui mencionado é em tudo semelhante ao ilustrado na fig. 2.4.

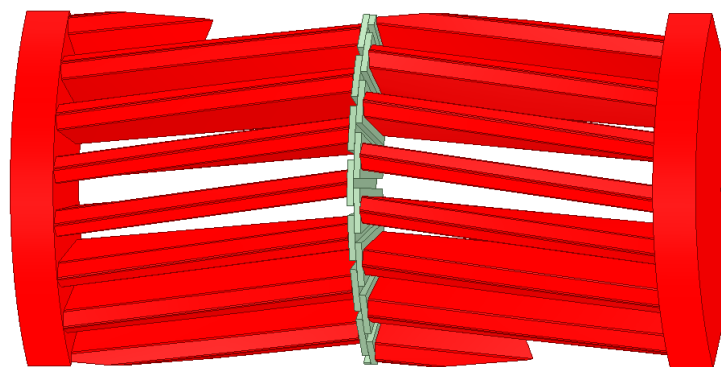


Figura 2.4 - Ilustração de um rotor com barras inclinadas com anel intermédio [Fonte: Autor]

2.3. Revisão da Literatura Técnica

Na literatura técnica sobre o assunto em questão é possível encontrar a justificativa para o uso do anel intermédio e para inclinação das barras, assim como as suas desvantagens.

Considerando que o rotor de um motor de indução teria as suas barras direitas, este tipo de rotor tem uma alta eficiência, no entanto, apresenta elevados valores de harmónicos assim como, um *ripple* elevado no binário desenvolvido [2]. Esta alta eficiência prende-se com o facto de a reatância equivalente do rotor apresentar um valor reduzido quando comparado com os outros rotores. O uso de rotores com barras inclinadas fará com que o conteúdo harmónico do campo magnético do entreferro seja significativamente reduzido, tendo como consequência a redução de vibrações e ruído [6]. Adicionalmente, o rotor com barras inclinadas também produzirá uma ligeira redução no binário desenvolvido pela máquina, assim como uma força axial no veio que tem o potencial de reduzir o tempo de vida do motor [2][7]. A diminuição do binário leva a que, para o mesmo ponto de carga, o deslizamento do rotor com barras inclinadas seja maior do que o deslizamento do rotor com barras direitas [2]. O maior deslizamento leva a maiores perdas por efeito de Joule no rotor. As perdas por efeito de Joule no rotor também aumentam devido ao aumento das correntes inter-barras e porque a inclinação das barras provoca o aumento da reatância total do rotor. O facto de as barras estarem inclinadas faz com que a distribuição do campo magnético ao longo da direção do veio seja variável o que leva a uma saturação magnética maior do rotor [2]. Em [8], é previsto que a inclinação das barras tenha uma influência positiva no binário desenvolvido pelo motor para valores elevados de deslizamento. Esta melhoria no binário seria provocada pelo aumento da resistência equivalente do rotor. A resistência equivalente sofre um aumento devido à presença de correntes inter-barras, uma vez que esta corrente está sujeita a uma resistência elétrica maior do que a corrente que circula dentro da gaiola de esquilo.

Devido aos efeitos negativos provocados pela inclinação das barras, estas não devem ser inclinadas mais do que o necessário. Sendo que o critério para definir o que é necessário

reside nos objetivos iniciais considerados para o desenho da gaiola de esquilo do rotor em causa. Sendo muitas vezes indicado como valor ótimo da inclinação o equivalente a uma barra do estator (igual a um passo de ranhura estatórica) [1][7].

O efeito provocado pela inclinação das barras no rendimento de um motor depende do tamanho do motor em questão. Segundo a referência [9], a inclinação das barras tende a diminuir as perdas por efeito de Joule provocadas pelos harmónicos da corrente e a aumentar as restantes componentes de perdas. A inclinação das barras será do interesse, em termos de rendimento, apenas para os motores em que as perdas por efeito de Joule provocadas pelos harmónicos da corrente sejam significativas - máquinas de tamanho e potência nominal reduzidos.

Uma solução industrial encontrada posteriormente referente a rotores injetados para motores de indução foi a introdução de um anel intermédio. O rotor resultante desta alteração tem barras inclinadas ao mesmo tempo que é criado um desfasamento entre os dois lados do rotor, tal como é ilustrado na fig. 2.4.

A introdução do anel intermédio permite que as correntes rotóricas mudem de barra a meio do pacote permitindo uma maior adaptação ao fluxo magnético a cada instante. Nas malhas criadas pelo anel intermédio, o máximo da diferença de potencial entre os diferentes pontos também será menor e, portanto, as correntes inter-barras serão menores em rotores com anel intermédio [10], o que leva a um rotor mais eficiente [2]. A introdução desta estrutura reduzirá o conteúdo harmónico do fluxo magnético no entreferro, quando comparados com o do rotor de barras inclinadas sem anel intermédio [2]. No entanto, a existência do anel intermédio irá diminuir de forma acentuada a densidade do fluxo no meio do rotor, pois o alumínio nesta região faz com que o entreferro virtual seja maior. Este fenómeno conduz a uma corrente em vazio maior e a um fator de potência menos favorável quando comparado com um rotor sem anel intermédio [2].

A força lateral no veio provocada pelo rotor de barras inclinadas sem anel intermédio, como ilustrado na fig. 2.3, pode ser resolvida ou pelo menos reduzida significativamente utilizando a geometria de rotor com anel intermédio e barras inclinadas, como ilustrado na fig. 2.4 [11].

Além dos artigos científicos que abordam este tema, há patentes desenvolvidas sobre o rotor de gaiola de esquilo e o anel intermédio.

Na fig. 2.5 está representada a solução proposta por Carl E. Johnson em [12]. O autor concorda com os artigos científicos citados anteriormente, afirmando que os rotores com barras direitas produzem mais ruídos de origem eletromagnética e que a solução encontrada para este problema, rotores com barras inclinadas, produz um binário máximo menor do que a solução inicial e desenvolve uma força lateral no veio anulada apenas com recurso a soluções que provocam perdas mecânicas adicionais. A solução proposta (fig. 2.5) reivindica capacidade de eliminar a força lateral no veio, manter um binário máximo comparável ao obtido com um rotor

com barras direitas e eliminar o ruído provocado pela não uniformidade do entreferro. A solução proposta consiste em rotores em que todas as barras são dobradas, formando duas secções não paralelas ao veio do motor.

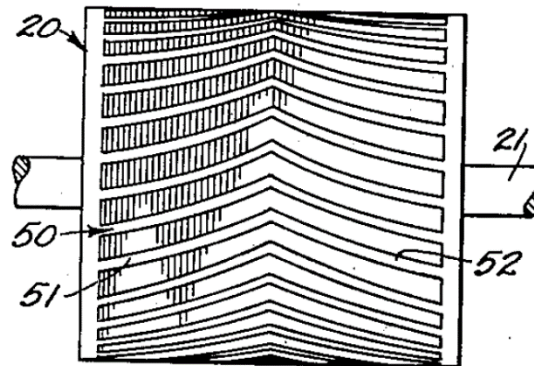


Figura 2.5 - Solução proposta por Carl E. Johnson [12]

Em 1936, Hans Lund [13] propõe uma solução alternativa para os rotores de gaiola de esquilo dos motores de indução. A solução está representada na fig. 2.6 e consiste num rotor com barras inclinadas contendo vários anéis intermédios ao longo do pacote. O autor afirma que esta solução tem a capacidade da redução do ruído produzido pelo motor, tanto o de origem eletromagnético, que faz a máquina vibrar de um modo geral, como o originado pelas vibrações de peças individuais enquanto o motor está em funcionamento, sem que o binário produzido seja reduzido.

Em 1950, Vilém Klíma [14] propõe uma solução (fig. 2.7) de rotor que também inclui uma ou várias estruturas semelhantes aos anéis intermédios indicados em [12] no entanto o objetivo era desenhar um rotor com uma relação entre resistência e reatância favorável a um binário de arranque elevado, mantendo um bom fator de potência. Trata-se de simular o comportamento que uma gaiola dupla de esquilo teria, através de uma estrutura semelhante a um anel intermédio.

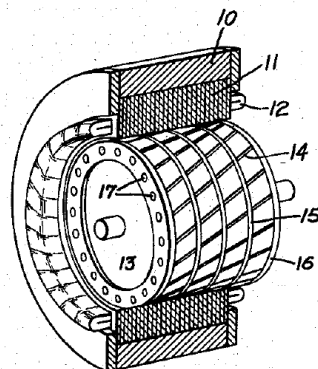


Figura 2.6 - Solução proposta por Hans Lund [13]

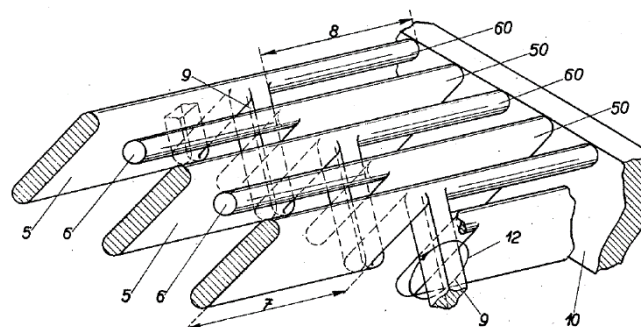


Figura 2.7 - Solução proposta por Vilém Klíma [14]

Na fig. 2.8 é representada a solução proposta por Philip L. Alger em [15]. Nessa mesma patente o autor afirma que o uso de um ou mais anéis intermédios num rotor em gaiola de esquilo traz várias vantagens para o desempenho do motor, nomeadamente uma distribuição mais uniforme do fluxo magnético no entreferro, que contribui para uma diminuição do ruído e da vibração do motor, assim como uma redução nas correntes entre as barras do rotor através das chapas magnéticas pois permite que esta circule entre barras por um caminho com resistência consideravelmente menor. Em [15] também é chamada a atenção para algumas possíveis desvantagens, como a dificuldade no processo de fabrico e o aumento da corrente de magnetização do motor, devido ao aumento do entreferro virtual.

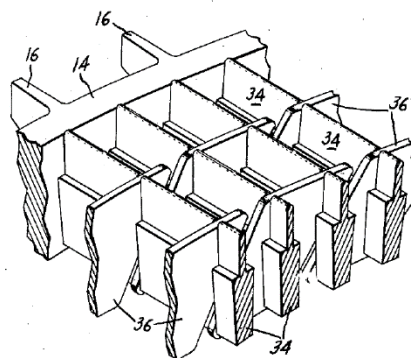


Figura 2.8 - Solução proposta por Philip L. Alger [15]

2.4. Circuito Equivalente do Motor

A análise que é realizada nos capítulos 4 e 5 será baseada nas relações das grandezas que se conseguem estabelecer recorrendo ao circuito equivalente do motor.

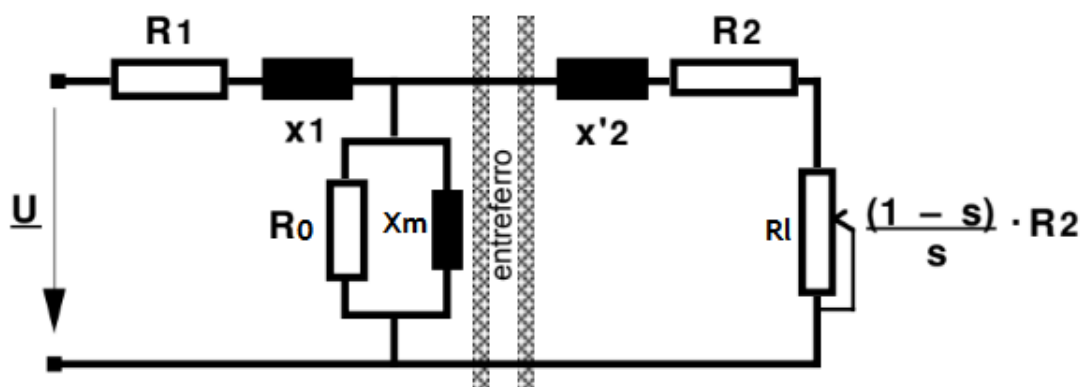


Figura 2.9 - Circuito equivalente do motor [16]

O circuito equivalente tem como propósito traduzir o comportamento de um motor de indução trifásico através de um modelo analítico. Um ponto fundamental para a precisão e exatidão dos resultados gerados por este modelo é a determinação dos diversos parâmetros que constituem o circuito equivalente. No entanto, nesta dissertação este modelo analítico apenas será utilizado para estabelecer relações entre as diversas grandezas dos motores em análise, não sendo usados os valores numéricos dos resultados.

Traçando as equivalências entre o circuito equivalente do motor e o próprio motor é estabelecido o significado de cada um dos componentes. A diferença de potencial denominado de \underline{U} diz respeito à tensão de alimentação de uma fase do motor. R_1 e x_1 são, respectivamente, a resistência e a reatância de fugas por fase dos enrolamentos de cobre que se encontram no estator. A resistência (retângulo preenchido a branco) e a reatância (retângulo preenchido a preto) que se encontram imediatamente à esquerda do 'entreferro' irão ser denominadas por R_0 e X_m . R_0 é uma resistência que representa as perdas no ferro, não tem uma representação direta ou localização específica no motor e X_m é a reatância que modeliza o fluxo magnético comum do motor. Por fim, R_2 e x'_2 são, respectivamente, a resistência e a reatância de fugas equivalente por fase do rotor. A resistência mais à direita na fig. 2.9 irá ser denominada por R_l e dissipa uma potência equivalente à potência mecânica total que está ser gerada pelo motor.

Capítulo 3

Desenvolvimento Prático

Com o mesmo intuito do capítulo anterior, que foi o de fundamentar a realização do trabalho de um ponto de vista teórico, neste capítulo é apresentada a fundamentação prática tida em consideração para a execução do trabalho referente a esta dissertação.

Assim, no presente capítulo vão ser expressas não só as metodologias e as ferramentas utilizadas para a obtenção desses mesmos resultados (simulações numéricas e ensaios laboratoriais), como também a justificação para a sua utilização e a explicação do seu funcionamento.

Ficando assim enquadrado o trabalho prático desenvolvido através das condições consideradas tanto para as simulações numéricas como para a construção dos protótipos e dos seus ensaios laboratoriais.

3.1. Justificação do Motor Escolhido

A escolha do motor que serviu como modelo base para as simulações numéricas e para ser utilizado nos ensaios laboratoriais foi feita com base em vários critérios, que tiveram em conta vários fatores e que serão expressos de seguida.

A dimensão da carcaça do motor foi um fator importante em ter em conta, uma vez que, caso o motor fosse excessivamente pequeno alguns protótipos seriam de difícil fabricação. Por outro lado, caso o motor fosse demasiado grande, a fabricação dos protótipos seria muito dispendiosa e demorada. Outro ponto a ter em conta é que quanto maior for a dimensão da carcaça do motor, maior será o domínio das simulações numéricas, tornando o cálculo mais lento.

A potência estipulada do motor é de igual importância. Um dos objetivos das simulações e dos ensaios laboratoriais é a comparação de perdas entre os diferentes rotores.

De modo a evitar que as medições realizadas sejam influenciadas significativamente pelos erros de medição, é interessante que as perdas tenham valores absolutos significativamente maiores do que os erros. No entanto, o nível de potência de estipulada está altamente relacionado com a dimensão da carcaça do motor.

Outro ponto que se teve em consideração foi a limitação dos aparelhos no laboratório. Uma vez que se pretende fazer a recolha da curva de binário em relação ao deslizamento, a bancada onde esta recolha é possível, tem um limite para o binário máximo.

Com objetivo de diminuir o tempo de simulação, foram tidos em conta mais dois critérios: o número de polos do motor e os números de ranhuras estatóricas e rotóricas.

Quanto ao primeiro (número de polos do motor), sabe-se que não tem uma influência significativa no nível de dificuldade de construção de protótipos ou na realização dos seus ensaios laboratoriais; mas a fração do motor que necessita de ser modelada e simulada é inversamente proporcional ao número de polos, o que significa uma possível redução do domínio a analisar e um menor número de elementos na malha desenvolvida pelo Método dos Elementos Finitos.

Quanto ao segundo (número de ranhuras estatóricas e rotóricas), em que o objetivo continua a ser o de reduzir o domínio a analisar, não só é importante que os números de ranhuras, tanto no estator como no rotor, sejam simultaneamente divisíveis pelo número de polos como, para além disso, que o número de ranhuras estatóricas por polo e por fase seja também ele inteiro.

Considerando todos os critérios enunciados anteriormente e de entre os modelos disponíveis, o modelo que mais se adequa às condições e limitações impostas é o motor “IEC 112 4p 5,5 kW 60 Hz 380 V” ilustrado na fig. 3.1, ou seja: motor de indução trifásico de rotor em gaiola de esquilo (alumínio), para alimentação a 60 Hz com 380 V(Y) / 220 V (Δ), 4 polos, potência estipulada $P_N = 5,5 \text{ kW}$ e com altura de eixo $H = 112 \text{ mm}$.



Figura 3.1 - Motor escolhido para a realização do estudo [17]

3.2. Simulações Numéricas e Algumas Considerações

3.2.1. Método Numérico Utilizado

As simulações numéricas foram realizadas com recurso ao Método dos Elementos Finitos no ambiente 2D e 3D. Este método é uma ferramenta comumente utilizada na resolução de equações diferenciais em várias áreas da física. Neste caso, as equações diferenciais dizem respeito às equações de Maxwell tendo em consideração as características eletromagnéticas dos materiais utilizados.

O referido método será explicado, em breves palavras, nos próximos parágrafos. Para tal foi utilizado [18] como texto de referência.

O Método dos Elementos Finitos recorre à divisão do domínio do problema em vários subdomínios (elementos) caracterizados por formas geométricas simples. Os vários subdomínios originados por este método ocupam a totalidade do domínio original sem se sobreporem uns aos outros.

O objetivo deste método é calcular os vários campos eletromagnéticos nos vários elementos do domínio. Estas soluções são expressas em termos de polinómios de grau não muito elevado, o que não permite encontrar uma solução que resolva, de forma exata, as equações diferenciais iniciais e as suas condições de fronteira. No entanto, existem várias estratégias que permitem contornar esta limitação. Uma delas, e a mais utilizada, consiste em fazer com que a média dos valores residuais de cada elemento seja zero.

A precisão deste método depende fortemente do tamanho atribuído para os vários elementos. A solução aproximada tende para a solução exata se o tamanho de cada elemento tender para zero e, portanto, o número de elementos no domínio de um problema tende para infinito.

Uma vantagem deste método é a sua capacidade de ser adaptável a geometrias complexas. Normalmente, quando o domínio é constituído por geometrias complexas, os elementos formam uma malha (grelha não estruturada). Nos casos em que o domínio pode estar contido num único plano, os elementos terão a forma geométrica de triângulos; quando o domínio for um espaço que necessite de ser descrito com três dimensões, os elementos serão poliedros (tetraedros, prismas ou pirâmides). As malhas são bastantes úteis não só para discretizar geometrias complexas, mas também para discretizar de uma forma mais fina as zonas em que é pretendida maior precisão na solução, como pode ser observado na figura 3.2.

O Método dos Elementos Finitos apresenta uma desvantagem clara em relação a outros algoritmos com objetivos semelhantes, nomeadamente o chamado Método das Diferenças Finitas. Essa desvantagem consiste na necessidade de mais recursos computacionais tanto em termos de memória como em termos de tempo de processamento.

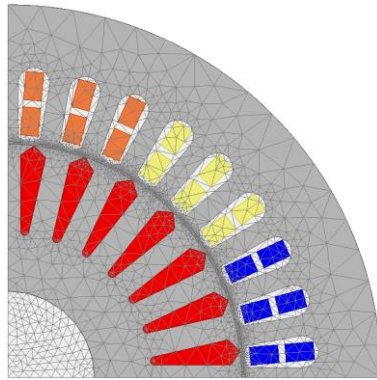


Figura 3.2 - Malha utilizada na simulação de um modelo 2D [Fonte: Autor]

3.2.2. Determinação dos Parâmetros de Simulação

Existem dois parâmetros principais através dos quais é possível manipular a precisão dos resultados, assim como o tempo de computação necessário para o cálculo das mesmas. Esses dois parâmetros são: período de amostragem (*time step*) e discretização do domínio (número de elementos).

Uma vez que o Método dos Elementos Finitos calcula, de forma discreta, o comportamento dos campos eletromagnéticos ao longo de um certo período de tempo. O período de amostragem diz respeito ao avanço temporal entre cada instante em que os cálculos são realizados.

O tempo de computação de uma simulação está relacionado com o intervalo de amostragem e com a discretização do domínio do problema. Sendo que o tempo de simulação será tanto maior quanto menor for o intervalo de amostragem e quanto mais fina for a discretização do domínio do problema. No entanto, a precisão dos resultados tem o comportamento inverso ao tempo de computação, sendo que para aumentar a precisão dos resultados é necessário fazer uma discretização mais fina do domínio e diminuir o período de amostragem. Por isso foi necessário encontrar um ponto de equilíbrio entre a precisão dos resultados obtidos pelas simulações e o tempo que as mesmas levam até ficarem concluídas.

Os estudos realizados para determinar o valor de cada um dos parâmetros que proporciona uma relação equilibrada entre a precisão dos resultados e o tempo de computação são apresentados nas secções seguintes.

3.2.2.1. Período de Amostragem

O estudo para definir qual o período de amostragem mais adequado foi realizado sobre um modelo em 2D inspirado no motor escolhido na secção 3.1, mas considerando um rotor com barras direitas. O modelo encontra-se representado na fig. 3.2.

O procedimento realizado para determinar qual o intervalo de amostragem que melhor conciliava a precisão de resultados com o tempo de simulação, foi o seguinte: mantendo

exatamente o mesmo domínio, geometria do motor, malha de elementos, velocidade de rotação e todas as outras variáveis, apenas se alterou o período de amostragem, sendo realizada uma simulação para cada uma das condições. Os períodos de amostragem estão apresentados na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Períodos de amostragem

Descrição	Tempo (s)	Pontos de Amostragem por Ciclo de Alimentação
1/(60*60)	$2,778 * 10^{-4}$	60
1/(60*120)	$1,3889 * 10^{-4}$	120
1/(60*200)	$8,333 * 10^{-5}$	200
1/(60*260)	$6,4103 * 10^{-5}$	260
1/(60*320)	$5,0283 * 10^{-5}$	320
1/(60*380)	$4,3860 * 10^{-5}$	380
1/(60*440)	$3,7879 * 10^{-5}$	440
1/(60*500)	$3,3333 * 10^{-5}$	500

Os resultados obtidos pelas simulações estão expressos na tabela 3.2. Através dos resultados é possível verificar a influência que o período de amostragem tem sobre os valores para cada uma das grandezas consideradas.

Como é possível verificar nem todas as grandezas variam da mesma forma ou magnitude. Tanto as perdas no ferro, as perdas Joule no rotor assim como o binário desenvolvido sofrem uma variação significativa, no entanto a variação maior dá-se quando se passa de 60 para 120 pontos de amostragem por ciclo de alimentação, sendo que entre as demais condições também alteram os valores das grandezas mas numa magnitude menor. Das fig. 3.3 à fig. 3.6 os resultados estão expressos de uma maneira que permite uma análise mais prática.

Analisando criteriosamente os resultados e considerando tanto o tempo de simulação (fig. 3.6) como a variação nos valores das grandezas elétricas (fig. 3.4 e fig. 3.5) e mecânicas (fig. 3.3), a conclusão é que a utilização de 120 pontos de amostragem por ciclo de alimentação será um valor para o período de amostragem que garante precisão nos resultados da simulação sem um aumento muito expressivo no tempo de simulação.

Considerando que à medida que se aumenta os pontos de amostragem por ciclo de alimentação a solução obtida se irá aproximando da solução exata, é possível considerar que a utilização de 120 pontos de amostragem por ciclo de alimentação garante uma precisão adicional relevante em relação à precisão obtida aquando da utilização de 60 pontos de amostragem por ciclo de alimentação. Uma vez que os resultados obtidos com 120 pontos por ciclo estão significativamente mais próximos daqueles obtidos na região em que os resultados estão estáveis, ou em algumas grandezas, próximos de estáveis.

A razão pela qual não se opta pelo valor mais próximo da solução exata deve-se ao elevado tempo de computação necessário para completar as simulações com tal valor a definir a amostragem.

Tabela 3.2 - Resultados obtidos através da variação do período de amostragem

Descrição	Potência Útil (W)	Binário (N.m)	Perdas Joule Estator (W)	Perdas Ferro (W)	Perdas Joule Rotor (W)	Corrente Fase (A)	Corrente Fundamental (%)	Tempo (min)
1/(60*60)	6132,002	33,653	377,582	90,293	183,689	12,427	99,96	67
1/(60*120)	6149,237	33,7476	377,865	98,512	186,173	12,432	99,83	85
1/(60*200)	6147,505	33,7381	378,147	101,060	187,476	12,436	99,84	118
1/(60*260)	6145,815	33,7289	378,240	101,751	187,971	12,438	99,84	184
1/(60*320)	6143,088	33,7139	379,149	100,186	188,348	12,453	99,89	219
1/(60*380)	6144,066	33,7193	378,334	102,321	188,509	12,439	99,84	242
1/(60*440)	6143,637	33,7169	378,3629	102,466	188,669	12,440	99,83	294
1/(60*500)	6143,338	33,7153	378,381	102,547	188,794	12,440	99,84	335

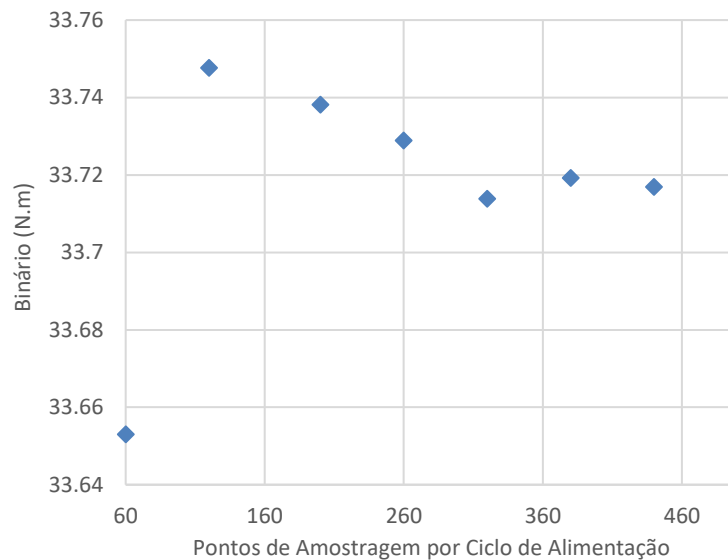


Figura 3.3 - Binário em função do número de pontos de amostragem

Dos parágrafos anteriores e dos resultados expressos na tabela 3.2 é possível defender que o período de amostragem adequado ao trabalho desenvolvido será de $1,3889 \times 10^{-4}s$, ou seja, 120 pontos de amostragem por ciclo de alimentação. No entanto, é preciso notar que esta opção tem como consequência a aceitação de algumas imprecisões nas simulações que serão

desenvolvidas, que terão que ser tidas em conta na análise posterior dos resultados. Durante a análise é necessário considerar que existe a possibilidade de as perdas no ferro e as perdas de Joule no rotor terem sido calculadas por defeito e o binário ter sido calculado por excesso.

O ideal seria a utilização de 500 pontos de amostragem por ciclo de alimentação, mas adotar essa opção tornaria a execução do trabalho inviável considerando o tempo disponível.

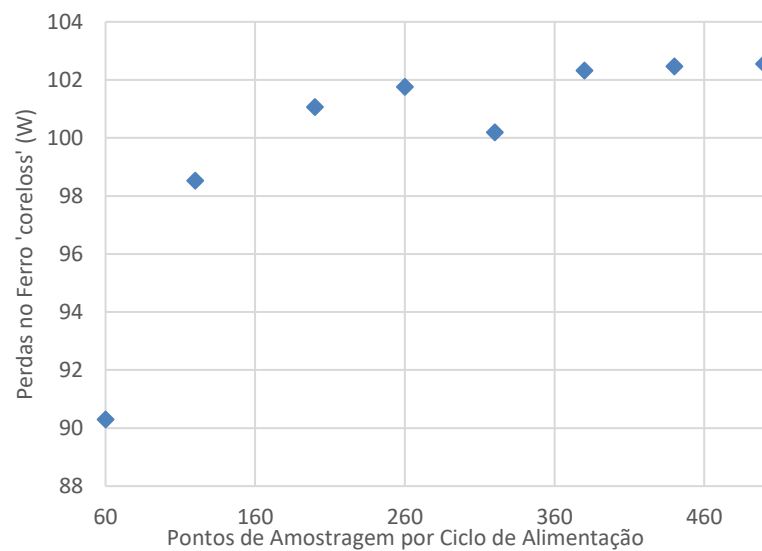


Figura 3.4 - Perdas no ferro em função do número de pontos de amostragem

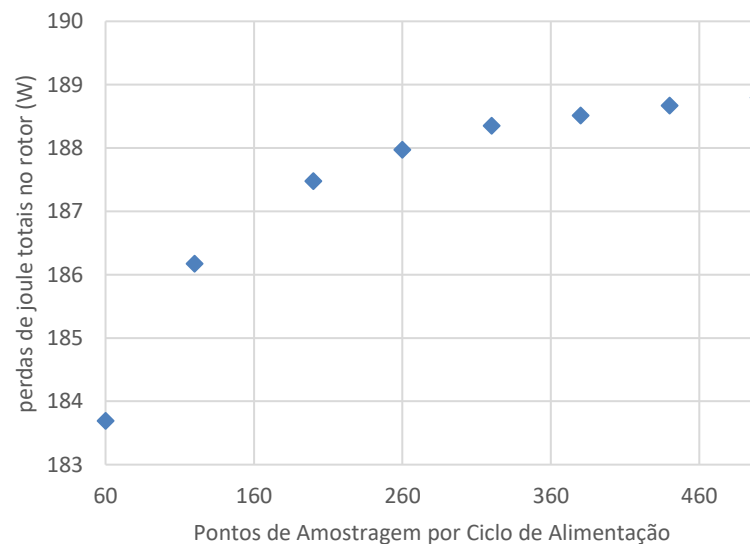


Figura 3.5 - Perdas Joule no Rotor em função do número de pontos de amostragem

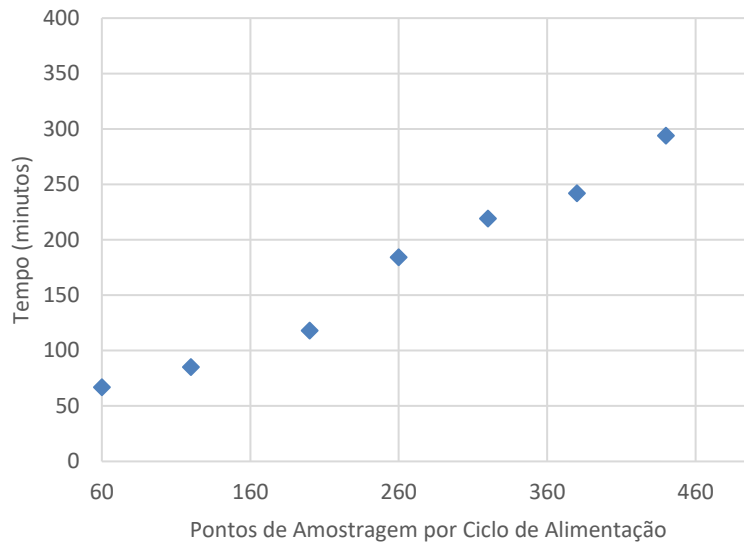


Figura 3.6 - Tempo da simulação em função do número de pontos de amostragem

3.2.2.2. Discretização do Domínio

Em relação a este parâmetro e uma vez que ele depende do domínio no problema e das geometrias dos diferentes componentes contidos neste, não é possível definir uma regra geral para aplicar em todos os modelos utilizados. No entanto e como apenas são experimentadas alterações no rotor do motor, mantiveram-se as mesmas condições para a discretização do domínio estatórico em todas as simulações.

No *software* utilizado, a discretização do domínio é definida pelo comprimento máximo da aresta que liga dois pontos na malha dos elementos finitos. Não havendo nenhuma regra teórica estabelecida para a determinação deste comprimento e devido ao tempo elevado necessário para efetuar um estudo semelhante ao realizado para a amostragem (secção 3.2.2.1), o comprimento máximo foi determinado tendo em atenção o número total de elementos do modelo e avaliando a qualidade da malha criada pelo programa depois de inseridos todos os parâmetros - a este propósito refira-se que uma malha com boa qualidade se caracteriza por ser constituída por poliedros cujas arestas têm valores semelhantes entre si (na fig. 3.7 é possível observar um exemplo de uma malha de baixa qualidade e na fig. 3.8 é possível observar um exemplo de uma malha de boa qualidade).

Além da qualidade da malha, também é importante verificar que ela se molda de forma correta a todos os pormenores de todas as geometrias em estudo.

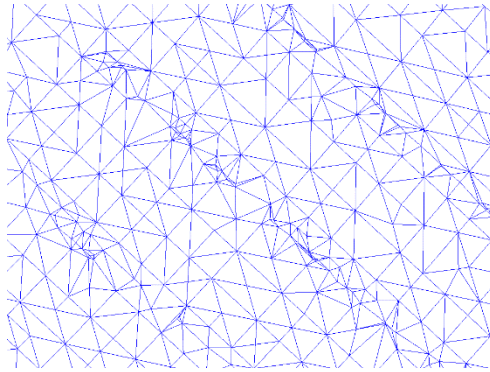


Figura 3.7 - Exemplo de malha de baixa qualidade [Fonte: Autor]

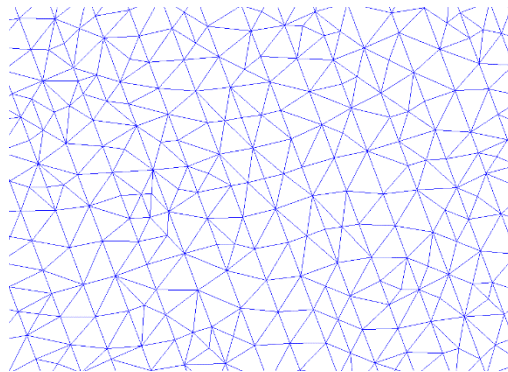


Figura 3.8 - Exemplo de malha de boa qualidade [Fonte: Autor]

Por último, é ainda possível definir onde se pretende uma malha mais fina e, consequentemente, resultados mais precisos. Tendo em conta os objetivos propostos para este estudo, as regiões do domínio em que é necessário maior precisão dizem respeito à zona em que se encontra o anel intermédio, assim como à zona respeitante ao entreferro - a título de exemplo, na fig. 3.9 ilustra-se a diferença entre as malhas numa região em que se pretende maior precisão, em contraste com outra em que a precisão não é um fator tão crítico.

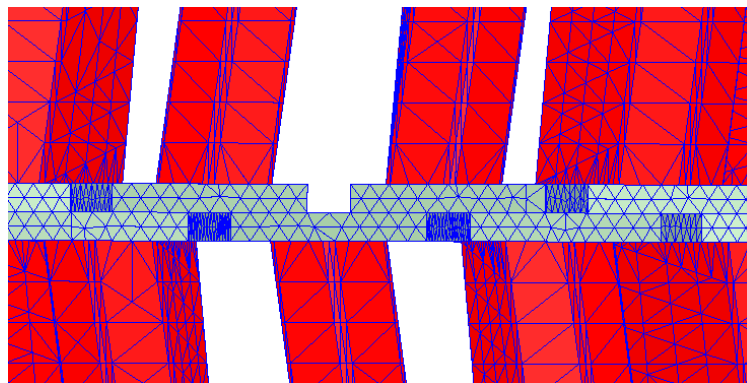


Figura 3.9 - Diferença entre as malhas em diferentes regiões do modelo [Fonte: Autor]

Na fig. 3.9 a zona em que se pretende maior precisão corresponde à área do anel intermédio. É possível concluir isto uma vez que os poliedros naquela área são menores do que aqueles que discretizam as demais áreas.

3.2.3. Software Utilizado

O *software* utilizado durante todo o desenvolvimento foi o *ANSYS® Electromagnetics Suite 19.0.0*. Este *software* tem como uma das suas funções calcular campos eletromagnéticos de baixa frequência em máquinas elétricas e outras aplicações; para o efeito, baseia-se no Método dos Elementos Finitos para resolver de forma numérica as equações diferenciais, neste caso, equações de Maxwell, no domínio definido e caracterizado pelo modelo.

Com a exceção de algumas validações feitas no início do trabalho, em que se realizaram simulações em duas dimensões (2D), todo o restante do trabalho foi desenvolvido recorrendo às ferramentas dedicadas ao cálculo de modelos em três dimensões (3D).

3.2.4. Características da Máquina Utilizada

A máquina utilizada para proceder às simulações no *ANSYS® Electromagnetics Suite 19.0.0* (ver características técnicas na tabela 3.3) foi somente dedicada à execução do programa e execução dos cálculos necessários. O restante trabalho de processamento de resultados foi realizado em máquina independente.

Tabela 3.3 - Características da máquina utilizada no cálculo das simulações

Componente	Característica
Modelo	HP Z800 Workstation
Sistema Operativo	Microsoft Windows 7 Professional
Processador	Intel® Xeon® CPU X5690 @ 3,47GHz, 3459 MHz, 6 Núcleos
Memória RAM	48,0 Gb
Capacidade de Armazenamento	1TB

3.2.5. Tempo de Computação

As simulações referentes ao estudo do uso do anel intermédio foram realizadas tendo em consideração as relações estabelecidas na secção 3.2.2, assim como os valores definidos para ambos os parâmetros.

As simulações em 3D demoraram um total de 32 dias de computação, sendo de referir que os rotores com anel intermédio necessitam de uma discretização do domínio mais fina, devido à maior quantidade de pormenores no seu desenho e que, por isso, ocuparam mais de metade do tempo total de computação. Já o intervalo de amostragem foi mantido constante para todas as simulações de todos os rotores.

3.2.6. Limites e Aproximações das Simulações Numéricas

O *software* utilizado para a execução das simulações numéricas apresenta vários limites práticos e aproximações nos cálculos.

Os limites práticos prendem-se com a modelização de pormenores que iriam aumentar consideravelmente o número de elementos na malha. A título de exemplo, a inclusão das correntes inter-barras nas simulações numéricas é, na teoria, possível. Seria necessário modelar cada uma das chapas do rotor e definir uma resistência para a interface do alumínio das barras com o ferro das chapas. No entanto, a modelização das chapas de um rotor elevaria o número de elementos da malha de elementos finitos a um ponto que tornaria o tempo de computação demasiado alto, tornando inviável, na prática, a sua execução. Em [19] é desenvolvido um modelo capaz de incluir as correntes inter-barras nos cálculos da simulação numérica; no entanto, para modelar apenas uma barra do rotor e o ferro que a envolve são necessários 763512 elementos, ao passo que o modelo com mais elementos utilizado neste trabalho não tem mais de 300000 elementos.

Algumas aproximações são inerentes a um programa de simulação numérica. Tanto por via de exclusão de algum componente, neste caso as perdas mecânicas, como por via da natureza do cálculo iterativo e da discretização do domínio.

Nas simulações numéricas executadas neste trabalho não foram consideradas as perdas mecânicas do motor. Como o objetivo é fazer uma análise comparativa entre os desempenhos do motor com os diferentes rotores, e uma vez que as perdas mecânicas são aproximadamente iguais em todos os casos ensaiados, a sua ausência nas simulações não altera a relação dos resultados das diferentes simulações. Além de que o motor escolhido para a execução do estudo apresenta perdas mecânicas reduzidas, na ordem de alguns watts.

No que se refere à temperatura, foi considerada a mesma temperatura de estabilização térmica para todos os casos. Esta consideração não é necessariamente verdadeira e poderá necessitar da realização de alguns ajustes e considerações extras quando se analisar os resultados das simulações em comparação com os resultados laboratoriais. Uma maneira de ajustar as simulações seria repetir as mesmas depois dos ensaios laboratoriais e utilizar os dados da estabilização térmica na simulação numérica.

Outra componente que, apesar de não ser desprezada, será tratada de forma independente, é referente às perdas no ferro. Estas são calculadas durante a simulação numérica, mas o seu resultado não influencia no restante da simulação. Foi tomada esta decisão com o objetivo de reduzir o tempo de computação mantendo o cálculo das perdas no ferro, que é uma informação importante para que seja possível uma análise completa e relevante no comportamento de um motor.

As outras aproximações estão ligadas ao facto de as equações diferenciais que descrevem o comportamento dos campos eletromagnéticos serem resolvidas de forma iterativa

recorrendo a métodos numérico, assim como ao facto do domínio não ser tratado como um meio contínuo, mas sim discretizado através dos elementos criados pelo próprio Método dos Elementos Finitos.

3.3. Ensaios Laboratoriais

O uso de ensaios laboratoriais neste estudo tem como objetivo a validação dos resultados das simulações numéricas. Os protótipos desenvolvidos são submetidos a alguns ensaios laboratoriais, nomeadamente, ensaio de tipo, ensaio de curva de binário, ensaio de vibração e ruído.

3.3.1. Ensaio de tipo em motores de indução trifásicos

O ensaio é baseado na norma IEC 60034-2-1:2014 *Rotating electrical machines - Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)* e o seu procedimento está descrito nos parágrafos que se seguem.

O objetivo do ensaio de tipo é avaliar a elevação da temperatura do motor em 100% de carga e realizar a segregação das perdas avaliando o desempenho do motor em diferentes níveis de carga, sendo 150%, 100%, 50%, e 25% da carga nominal.

O ensaio começa com a medição da resistência elétrica a frio dos enrolamentos por fase do estator, feita a partir dos seus terminais, sendo que a temperatura ambiente também é registada.

Seguidamente, faz-se o ensaio do motor com o seu rotor bloqueado, em que o mesmo é acoplado a um dinamómetro e alimentado com a tensão e frequência estipuladas; nestas condições, mede-se o binário de arranque direto do motor.

A terceira etapa corresponde ao ensaio de elevação de temperatura com potência útil constante (estipulada). Nele, o motor é mais uma vez acoplado a um dinamómetro que impõe a plena carga ao motor, com ele alimentado à tensão e frequência estipuladas. Ao longo deste ensaio são feitas medições da temperatura em intervalos de tempo iguais até a estabilização térmica do motor com o objetivo final de medir a elevação de temperatura.

A etapa seguinte é o ensaio em carga com tensão e frequência constantes (estipuladas). Para isso o motor é sujeito a vários fatores de cargas (150%, 125%, 100%, 50%, e 25%) com o objetivo de medir as correntes por fase, as potências elétricas absorvidas, a velocidade de rotação e o binário (útil) desenvolvido.

O ensaio de binário máximo corresponde ao quinto procedimento e tem como objetivo medir o binário máximo que o motor é capaz de desenvolver com alimentação estipulada, bem como a velocidade a que o mesmo ocorre.

Por último é feito o ensaio em vazio. Este é feito com o motor quente e sem nenhum tipo de carga acoplada ao seu veio. O motor é alimentado com diferentes valores de tensão desde 110% da tensão estipulada e passando por vários pontos até atingir apenas 30% daquele valor, sempre com frequência estipulada. O objetivo deste ensaio é determinar as perdas do motor em vazio, monitorando as potências elétricas absorvidas pelo mesmo.

3.3.2. Ensaio de Curva de Binário

Este ensaio baseia-se na norma IEEE 112 - *Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*.

O objetivo deste ensaio é fazer o registo da curva de binário em relação à velocidade de rotação do motor. No entanto, devido às limitações do equipamento que constituem a bancada onde este ensaio é realizado, o mesmo é executado com uma tensão de alimentação reduzida (concretamente, 260 V (Y) - 60 Hz e não 380 V (Y) - 60 Hz).

O ensaio é realizado com o motor a frio. O veio do motor é mecanicamente acoplado a um dinamómetro e alimentado nas condições indicadas anteriormente. De seguida é feito o arranque direto do motor e, através do dinamómetro, são recolhidos cerca de 220 pares de pontos que relacionam a velocidade de rotação com o binário desenvolvido. Através deste conjunto de registos é possível construir a curva de binário desde 0 rpm até à sua velocidade de sincronismo (característica mecânica de binário).

3.3.3. Ensaio de Vibração e Ruído em Carga

O objetivo deste ensaio é medir a vibração e o ruído produzido pelo motor quando este se encontra no seu ponto de funcionamento estipulado. Este tipo de ensaio não se encontra dentro do conjunto de ensaios padrão. Normalmente, é realizado um ensaio em vazio e aí são medidas as vibrações e os ruídos. O ensaio que é normalmente realizado (em vazio) não serve aos propósitos desta dissertação, uma vez que as correntes rotóricas em vazio são bastante reduzidas e uma vez que a alteração de caso para caso é apenas o rotor, as diferenças nos resultados poderiam ser reduzidas ou insignificantes. Por isso, foi desenvolvida uma bancada de ensaio que permita a medição da vibração e ruído com o motor em carga, para que os efeitos que os diferentes rotores provocam nas vibrações e ruídos do motor sejam maximizados e registados, possibilitando a comparação dos resultados das diferentes soluções rotóricas.

Este ensaio é executado de uma forma semelhante à de um ensaio em oposição (*back-to-back test*) com duas máquinas de indução: uma delas é o motor utilizado nos ensaios descritos anteriormente e que é posto a funcionar como motor (motor de ensaio), ligado diretamente à rede; a segunda é também ela um motor de indução mas com uma potência estipulada maior do que a do primeiro, posta a funcionar como gerador ligado a um inversor de

quatro quadrantes de modo a controlar o seu ponto de funcionamento e, por consequência, do primeiro motor também.

Com o objetivo de apenas medir o ruído produzido pelo motor que contém o rotor anteriormente simulado, foi instalada uma caixa de isolamento acústico sobre o gerador de modo que, aquando da medição do ruído, apenas seja medido o ruído gerado pelo motor que contém o rotor em ensaio. As medições de vibração e ruído foram realizadas na câmara acústica de modo a eliminar a influência do meio externo.

Por outro lado e de modo a isolar o motor do gerador em termos de vibrações mecânicas, o acoplamento entre os dois é realizado através de um acoplamento que utiliza um material que absorve de forma eficaz as forças mecânicas que lhe são aplicadas e também atenua os efeitos gerados pelo possível não alinhamento entre as duas máquinas.

Os dois motores estão montados na mesma base rígida e estão alinhados com o auxílio de pinos guias. Uma ilustração do esquema de montagem do ensaio (com exceção da caixa acústica) encontra-se na fig. 3.10.

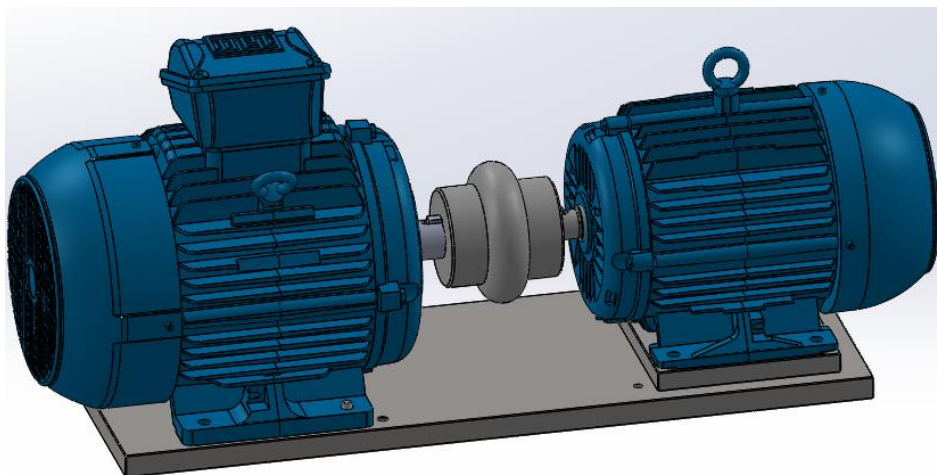


Figura 3.10 - Esquema do ensaio de vibração e ruído em carga [Fonte: Autor]

3.4. Rotores Usados nos Estudos

Entre as soluções encontradas na literatura técnica, artigos científicos e patentes relacionadas com este assunto foram selecionados algumas para serem objeto de estudo, descritas seguidamente de forma detalhada.

Além disso, nesta secção são justificados alguns dos parâmetros adotados nos rotores escolhidos, nomeadamente o ângulo de inclinação das barras, dimensionamento do anel intermédio e o ângulo de desfasamento das barras.

3.4.1. Rotores Escolhidos

Os rotores escolhidos para o estudo podem ser divididos em dois grandes grupos. O primeiro diz respeito aos rotores que não têm anel intermédio e o segundo grupo é referente aos rotores com anel intermédio.

3.4.1.1. Rotores sem Anel Intermédio

Os rotores sem anel intermédio são dois: um rotor cujas barras não apresentam nenhuma inclinação em relação ao veio do motor, sendo portanto paralelas ao veio do motor. Tal rotor está ilustrado na fig. 3.11; o outro rotor, que também não contém anel intermédio, é um rotor com barras inclinadas em tudo semelhante à solução utilizada na maior parte dos motores de indução e que foi ilustrado na fig. 2.3.

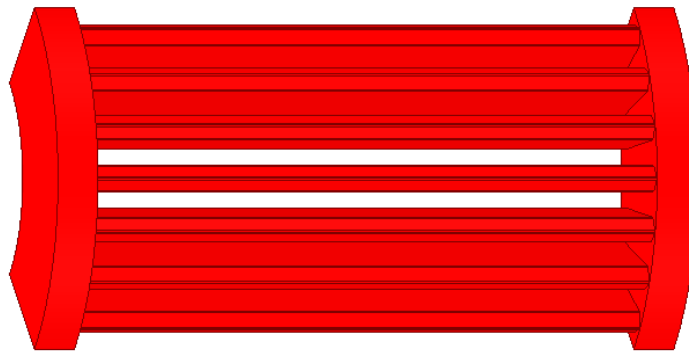


Figura 3.11 - Rotor com barras direitas sem anel intermédio [Fonte: Autor]

3.4.1.2. Rotores com Anel Intermédio

Neste grupo de rotores existem mais dois modelos de rotores: um deles está ilustrado na fig. 2.4 e contém barras inclinadas de ambos os lados do anel intermédio; esta inclinação das barras é simétrica em relação ao outro lado do anel. Além da inclinação ser simétrica, o rotor tem um ângulo de desfasamento exatamente a meio do pacote, criando a forma final do anel intermédio e uma descontinuidade das barras.

O outro rotor que se enquadra neste grupo é o rotor com barras direitas e anel intermédio (ver fig. 3.12); neste caso, as barras que seguem desde um anel de curto-circuito até ao anel intermédio são paralelas ao veio do motor. Este rotor também sofre um deslocamento exatamente no meio do pacote definido por um ângulo de desfasamento, criando uma descontinuidade nas barras tal como na fig. 2.4.

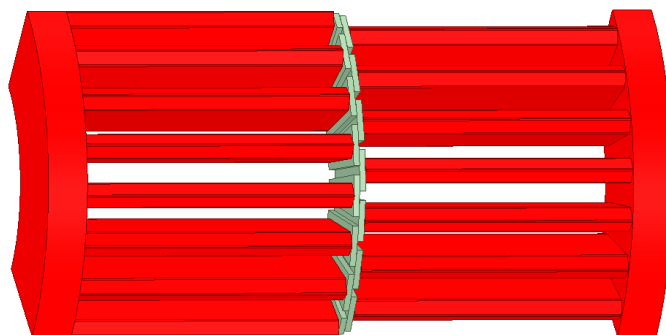


Figura 3.12 - Rotor com barras direitas com anel intermédio [Fonte: Autor]

3.4.2. Nomenclatura dos Rotores

Com o objetivo de tornar a nomenclatura de cada um dos rotores mais concisa e breve, cada um dos rotores irá ser numerado de acordo com a tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Numeração dos rotores

Numeração	Descrição
Rotor 1	Barras inclinadas sem anel intermédio
Rotor 2	Barras direitas sem anel intermédio
Rotor 3	Barras direitas com anel intermédio
Rotor 4	Barras inclinadas com anel intermédio

3.4.3. Parâmetros Adotados nos Rotores

Nesta secção é abordado o processo para a determinação dos parâmetros de dimensionamento do anel intermédio, definição da inclinação e desfasamento das barras.

3.4.3.1. Dimensionamento do Anel Intermédio

O dimensionamento do anel intermédio foi calculado com base em dois objetivos: o primeiro objetivo passa por reduzir ao mínimo o volume total do mesmo, uma vez que o alumínio tem uma permeabilidade magnética semelhante à do ar, produzindo assim um aumento do fluxo magnético nas chapas próximas ao anel, causando a saturação magnética nestas, consequentemente aumentando as perdas no ferro na região; por outro lado, o segundo objetivo consiste em evitar um aumento excessivo de perdas por efeito de Joule no rotor e um aumento de temperatura durante o funcionamento do motor, para tal é preciso garantir que a densidade de corrente se mantém igual no anel intermédio e nas barras, o que pode conduzir a uma maior secção transversal do mesmo. Trata-se portanto de um problema com múltiplos

critérios em que não é possível encontrar um ponto ótimo absoluto. Sendo necessário encontrar uma solução que consiga conciliar os dois critérios sem produzir um prejuízo significativo.

A geometria do anel intermédio utilizado nos modelos simulados, assim como nos protótipos construídos para este estudo, está ilustrado na fig. 3.13.

Um olhar mais cuidadoso sobre a geometria do anel intermédio permite concluir que o fluxo de corrente ao deixar uma das barras vai se dividir em duas direções, seguido para as barras que estão do lado oposto do anel intermédio, imediatamente à esquerda e à direita, tal como é ilustrado na fig. 3.14.

Desta forma, não é necessário garantir que a secção mínima transversal do anel intermédio seja igual à secção transversal da barra: é apenas necessário garantir que aquela seja igual a metade da secção da barra, sendo que a espessura do anel intermédio foi definida tendo em conta este critério.

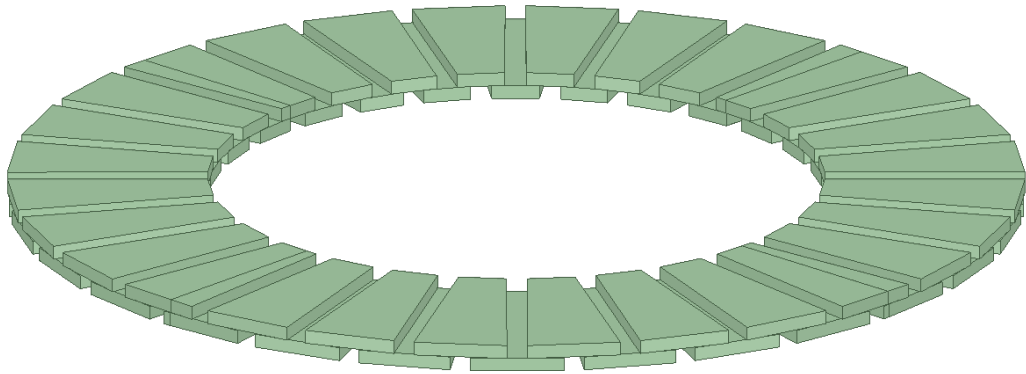


Figura 3.13 - Anel intermédio [Fonte: Autor]

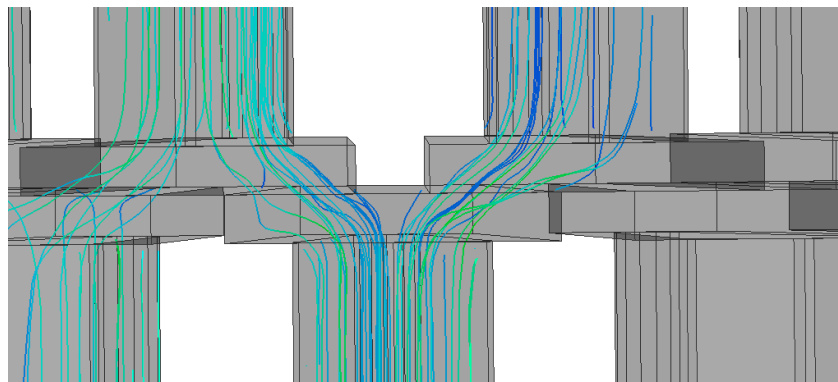


Figura 3.14 - Distribuição da corrente no anel intermédio de um rotor com barras direitas [Fonte: Autor]

3.4.3.2. Ângulo da Inclinação das Barras

A nomenclatura adotada nesta dissertação é a mesma de [20] e, portanto, o ângulo da inclinação das barras diz respeito ao ângulo de rotação da barra em relação ao veio do rotor (identificado como o ângulo α na fig. 3.15). O ângulo β é apenas um parâmetro utilizado na construção dos protótipos.

Nos rotores com barras inclinadas sem anel intermédio, conforme citado em [1] [7], o ângulo de inclinação das barras é o equivalente a uma ranhura do estator do motor, pois é uma solução eficaz na redução de harmônicos do campo magnético no entreferro. O estator escolhido para o estudo tem 36 ranhuras, resultando em um ângulo de inclinação igual a 10° geométricos.

No rotor com barras inclinadas com anel intermédio, considerando que o anel intermédio divide o rotor em duas partes iguais, em cada metade o ângulo de inclinação das barras continua a ser 10° geométricos. Optou-se por manter este valor com o objetivo de manter o mais constante possível a área de alumínio que é influenciada por uma ranhura do estator a cada instante, assim se pretende reduzir o conteúdo harmônico do campo magnético no entreferro e, consequentemente, o *ripple* do binário desenvolvido pelo motor.

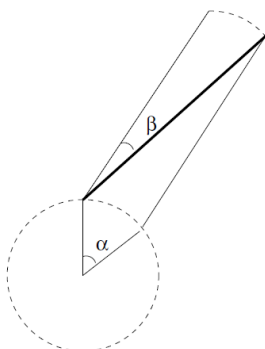


Figura 3.15 - Ângulos nos rotores de barras inclinadas [20]

3.4.3.3. Ângulo de Desfasamento das Barras

O ângulo de desfasamento das barras traduz a descontinuidade sofrida por uma barra ao atravessar o anel intermédio, como está ilustrado na fig. 3.16.

Este desfasamento tem como objetivo, assim como o ângulo de inclinação das barras, controlar a atenuação dos harmônicos no fluxo magnético do entreferro. O valor do ângulo de desfasamento das barras - referido em [11] como estando dentro do leque de valores que elimina os harmônicos do fluxo magnético no entreferro de forma mais eficaz - corresponde a metade do ângulo ocupado por uma barra da gaiola de esquilo do rotor, ou seja, o valor do ângulo de desfasamento das barras é de $6,43^\circ$ geométricos, já que o rotor contém 28 barras.

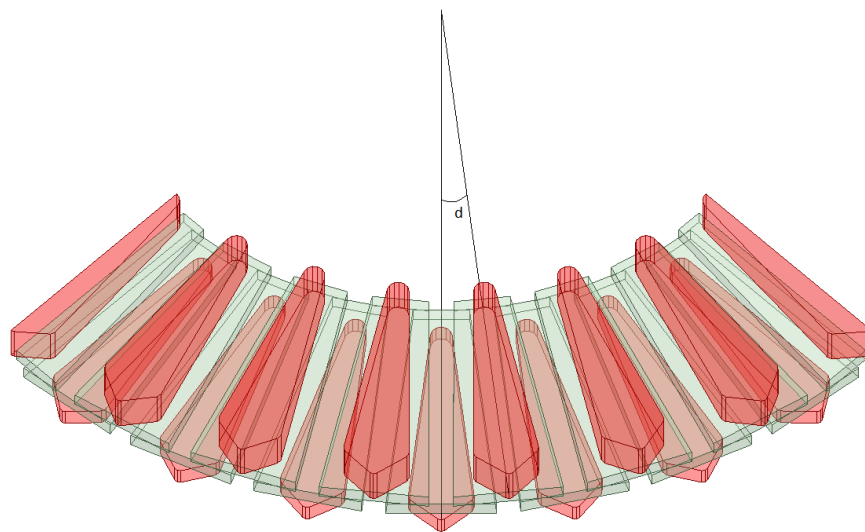


Figura 3.16 - Ângulo de Desfasamento das Barras [Fonte: Autor]

Capítulo 4

Resultados das Simulações Numéricas

Uma vez que nos capítulos anteriores foram expressas todas as condições, aproximações e limitações da componente prática do trabalho, é agora possível apresentar os resultados obtidos de uma forma completamente contextualizada.

4.1. Apresentação Sumária de Resultados

Os resultados a serem apresentados dizem respeito às simulações numéricas dos rotores (sem anel intermédio) ilustrados na fig. 2.3 (Rotor 1) e na fig. 3.11 (Rotor 2). A tabela 4.1 contém um resumo dos resultados das simulações. Uma análise mais detalhada será realizada na secção 4.2.

Tabela 4.1 - Resumo dos resultados das simulações numéricas

Grandezas	Rotor 1	Rotor 2
Potência Útil (W)	5503,46	5501,87
Binário (N.m)	30,10	30,09
Velocidade (rpm)	1745,96	1746,26
Deslizamento (%)	3,04	2,99
Corrente em Carga (A)	11,46	11,50
Fundamental (%)	99,78	99,17
PJ 1 (W)	321,31	323,33
Core Loss (W)	118,35	112,83
PJ 2 Fund. (W)	165,24	164,25
PJ 2 Harm. (W)	9,37	23,84

Antes de prosseguir para uma análise mais detalhada dos resultados da tabela 4.1, é pertinente fazer uma explicitação de algumas grandezas expressas. O ‘PJ 1’ refere-se às perdas por efeito de Joule no estator, a grandeza denominada por ‘Corrente em Carga’ diz respeito ao valor eficaz da corrente em cada uma das fases de alimentação e a ‘Fundamental’ refere-se à percentagem da componente fundamental da corrente relativamente à amplitude total da corrente por fase. O ‘PJ 2 Fund.’ e o ‘PJ 2 Harm.’ dizem respeito, respetivamente, às perdas por efeito de Joule causadas pela componente fundamental da corrente no rotor e às perdas por efeito de Joule causadas pelos harmónicos dessa mesma corrente do rotor. O campo ‘CoreLoss’ diz respeito às perdas no ferro calculadas pelo *software* que realiza as simulações numéricas. No entanto, é necessário fazer esta distinção entre ‘CoreLoss’ e as ‘Perdas no Ferro’ resultantes dos ensaios uma vez que no laboratório a medição das perdas no ferro incluem alguns componentes parasitas.

4.2. Influência da Inclinação das Barras

Nesta secção o objetivo é verificar qual o efeito da inclinação das barras nos rotores sem anel intermédio e comparar os resultados das simulações com o que foi previsto pelos artigos científicos na secção 2.3.

Uma vez que a diferença da potência desenvolvida entre os modelos com os dois rotores distintos é de 0.03%, a comparação direta entre os valores das grandezas é válido, não necessitando de proceder a nenhuma adaptação ou correção.

Relativamente à velocidade de rotação, e por consequência ao deslizamento, o rotor 2 apresenta um deslizamento menor. Este resultado era de esperar, pois o facto de não se inclinar as barras do rotor faz com que a área das mesmas que é influenciada pelo fluxo magnético que as envolve seja maior, induzindo uma corrente rotórica maior. Se a corrente rotórica é maior, então para produzir um determinado binário será necessário um deslizamento menor, e portanto uma velocidade de rotação maior. Este comportamento era esperado na literatura sobre o assunto.

Ao fazer uma análise do que aconteceria com as perdas por efeito de Joule no rotor caso o deslizamento aumentasse, era de esperar que as mesmas fossem menores para o rotor com menor deslizamento. Tal previsão é verdadeira apenas se forem consideradas as perdas por efeito de Joule no rotor causadas pela componente fundamental da corrente. Nas simulações numéricas tal efeito é verificado, no entanto a magnitude da alteração é reduzida, pois a diferença entre os deslizamentos foi pequena.

Quando se considera apenas o deslizamento para fazer uma previsão das perdas por efeito de Joule no rotor está-se a desconsiderar as perdas por efeito de Joule originadas pelos harmónicos das correntes rotóricas. Como verificado na tabela 4.1, esta componente de perdas é bem mais significativa no rotor 2 do que é no rotor 1.

O conteúdo harmónico das correntes estatóricas do motor com o rotor 1 e do rotor 2 podem ser verificados na fig. 4.1 e 4.2, respetivamente. Este conteúdo harmónico das correntes estatóricas irá influenciar o conteúdo harmónico das correntes rotóricas. Um maior conteúdo harmónico na corrente estatórica no motor com o rotor 2 em relação ao motor com o rotor 1 também se encontra de acordo com o previsto na literatura científica.

A fig. 4.1 e a fig. 4.2 dizem respeito ao conteúdo harmónico da corrente estatórica de apenas uma fase, é por isso que o 3º harmónico tem uma amplitude significativa. Caso fossem analisadas as três fases em conjunto este harmónico seria eliminado. No entanto, com esta análise por fase é possível verificar o comportamento deste harmónico para os diferentes rotores. O 3º harmónico tem a sua origem na saturação magnética do motor, e ao analisar um pequeno espectro do conteúdo harmónico das correntes estatóricas (fig. 4.3), é possível verificar que no rotor 1 a amplitude deste harmónico é maior do que no rotor 2, implicando uma maior saturação no rotor com barras inclinadas (rotor 1).

Os harmónicos com maior amplitude que estão presentes na corrente estatórica têm a sua origem nas ranhuras do rotor. As mesmas provocam a não uniformidade do entreferro segundo a direção radial. Segundo [21] os harmónicos que devem a sua origem às barras dos rotores podem ser calculados da seguinte maneira:

$$n = \frac{N_r}{p} \pm 1, \quad (4.1)$$

em que n é a ordem do harmónico, N_r é o número de barras no rotor e p corresponde ao número de pares de polos do motor. Da equação resulta que os harmónicos principais são o 15º e o 13º, respetivamente, 900 Hz e 780 Hz. Na fig. 4.2 os harmónicos com maior amplitude dizem respeito a 880 Hz e 760 Hz, a diferença entre o calculado teoricamente e o resultado da simulação deve-se ao deslizamento do rotor, pois o mesmo não está incluído no cálculo em (4.1). Analisando a fig. 4.1, é possível verificar que o 15º e 13º harmónicos foram bastante atenuados, tal como se previa nos artigos científicos e patentes industriais.

O valor eficaz da corrente por fase manteve-se praticamente inalterada nos dois casos, assim como as perdas por efeito de Joule no estator. Este comportamento seria esperado na condição do estator estar inalterada nas duas simulações, inclusive a temperatura. Na condição do motor mais quente, as perdas apresentaria uma alteração, uma vez que a resistência das bobinas depende da temperatura que se encontra o material condutor.

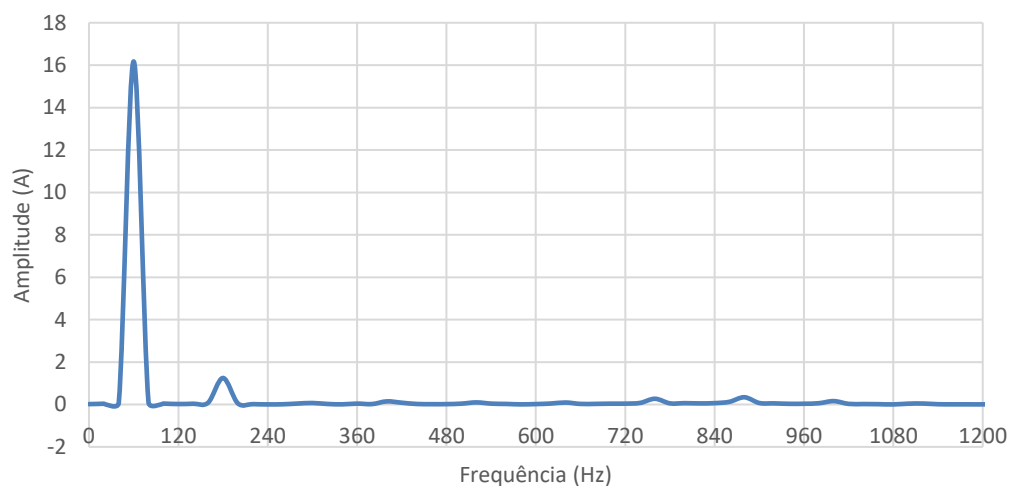


Figura 4.1 - Conteúdo harmónico das correntes estatóricas do motor com o rotor 1 (barras inclinadas sem anel intermédio)

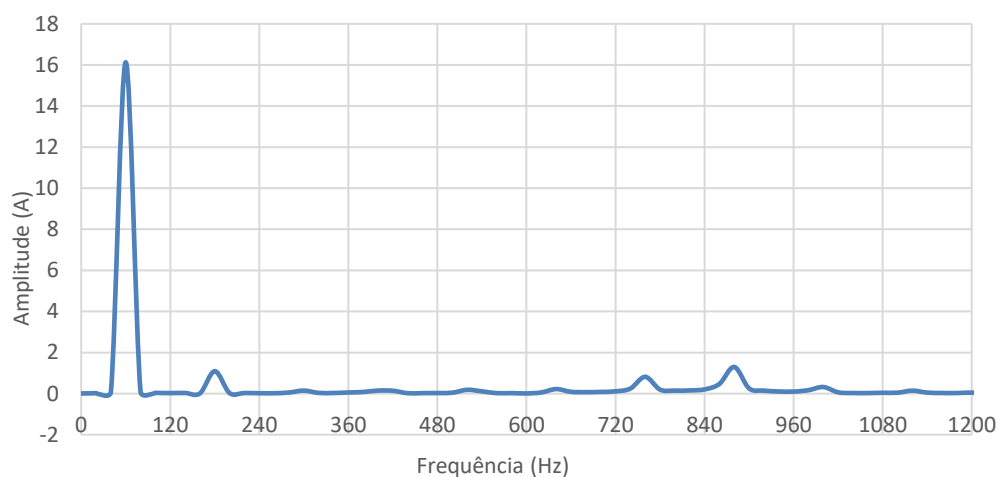


Figura 4.2 - Conteúdo harmónico das correntes estatóricas do motor com o rotor 2 (barras direitas sem anel intermédio)

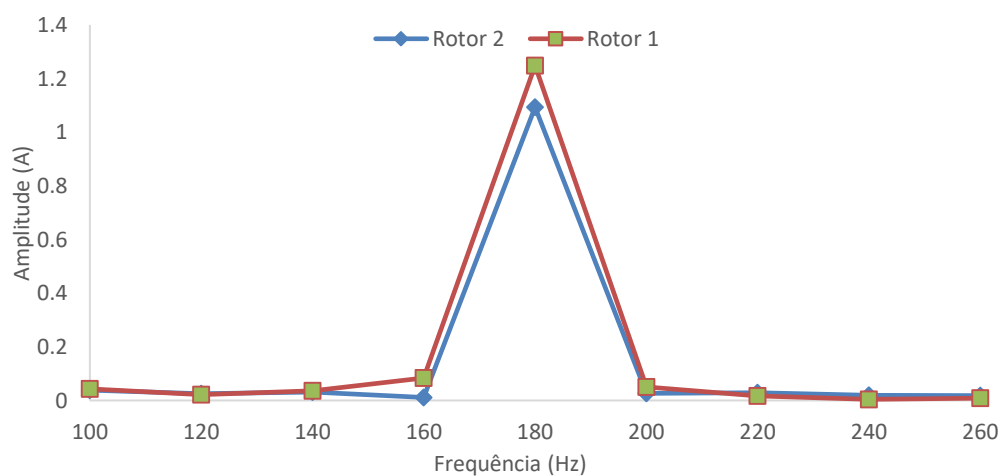


Figura 4.3 - Zoom do espectro do conteúdo harmónico das correntes estatóricas do motor com o rotor 1 (barras inclinadas sem anel intermédio) e do rotor 2 (barras direitas sem anel intermédio)

Resta analisar as perdas no ferro. A teoria defendia que o motor com o rotor 1 teria maiores perdas no ferro do que o motor com o rotor 2, e tal comportamento verificou-se nas simulações. Verificou-se, tal como antecipado na teoria, que a variação do campo magnético segundo a direção axial (linha imaginária paralela ao veio que une os dois anéis de curto-circuito) seria maior no rotor 1 (com barras inclinadas) do que aquela verificada no rotor 2 (com barras direitas). Tal pode ser verificado na fig. 4.4 e fig. 4.5.

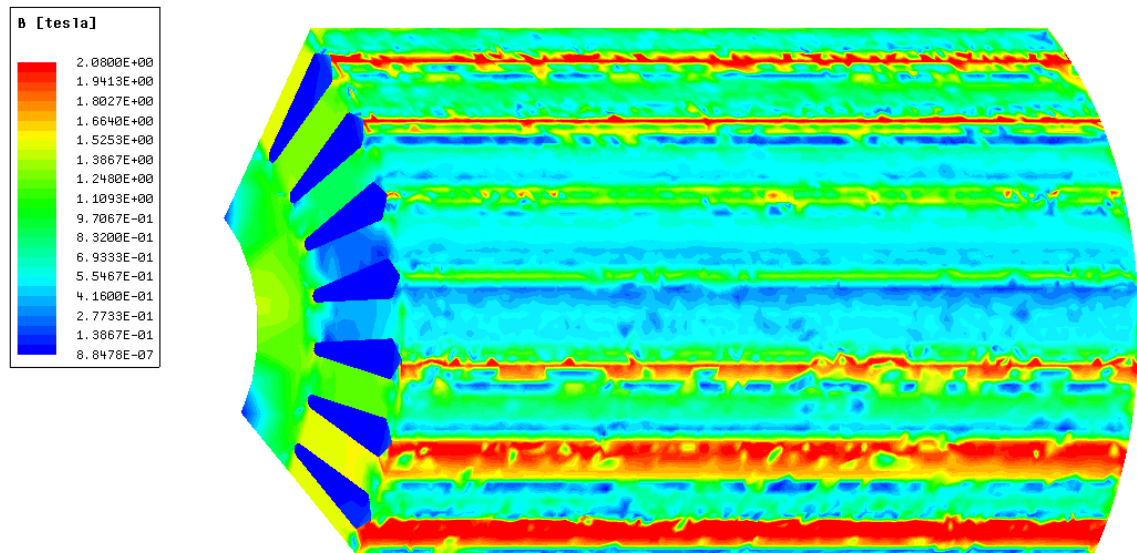


Figura 4.4 - Amplitude do campo magnético no rotor 2 (barras direitas sem anel intermédio)
[Fonte: Autor]

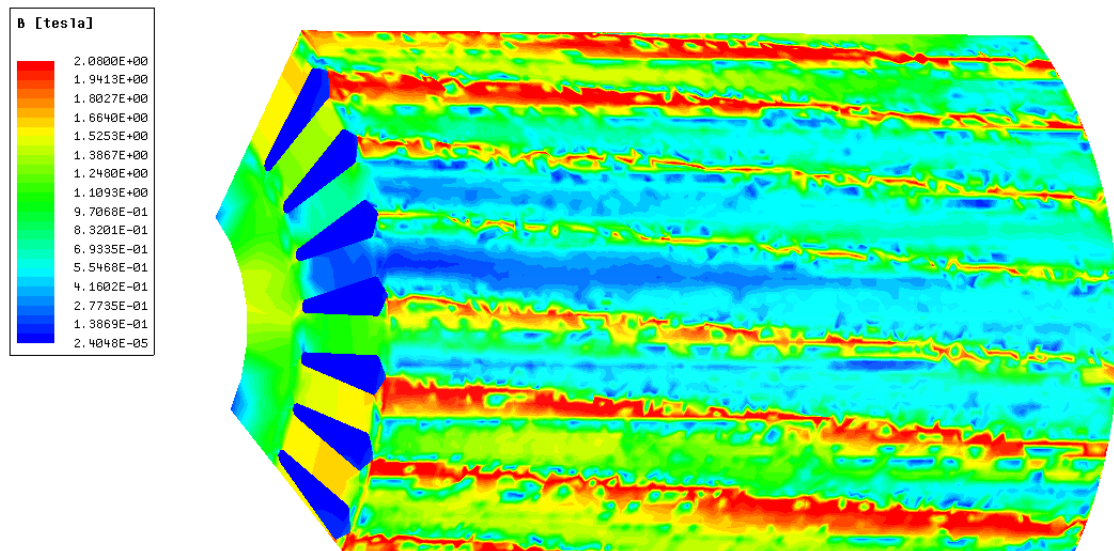


Figura 4.5 - Amplitude do campo magnético no rotor 1 (barras inclinadas sem anel intermédio)

4.3. Considerações Finais em relação à Inclinação das Barras

As simulações realizadas com os rotores sem anel intermédio concordaram com as previsões teóricas. Com exceção para as perdas por efeito de Joule no rotor, que se justifica pela não consideração (calculada em função do deslizamento do rotor) das perdas por efeito de Joule originadas pelos harmónicos das correntes rotóricas. De notar que o facto do circuito equivalente da fig. 2.9 apenas considerar as perdas por efeito de Joule originadas pela componente fundamental da corrente, prende-se com o facto de a generalidade dos motores utilizar um rotor com barras inclinadas e sem anel intermédio, onde a componente de perdas gerada pelos harmónicos da corrente rotórica é pequena.

A redução dos harmónicos da corrente estatórica no motor com o rotor 1 também é confirmado pelas simulações realizadas.

Portanto, a inclinação das barras irá melhorar o desempenho do motor em termos de vibrações e ruído, devido à diminuição do conteúdo harmónico na corrente estatórica. No entanto, o aumento das perdas que era esperado [2] não se verificou, registando-se o contrário. Esta contradição entre os artigos científicos e o resultado das simulações poderá ter origem no facto que se manteve a temperatura constante e na não consideração das correntes inter-barras no rotor durante as simulações.

4.4. Notas sobre os resultados das Simulações Numéricas

Inicialmente pretendia-se para esta dissertação a execução das simulações numéricas referentes aos quatro rotores identificados na tabela 3.4. Várias tentativas foram feitas para que fossem obtidos resultados coerentes nas mesmas, no entanto tal não foi alcançado.

As simulações que ficaram por fazer de uma forma satisfatória foram as que dizem respeito ao rotor 3 (rotor com barras direitas com anel intermédio) e o rotor 4 (rotor com barras inclinadas com anel intermédio). Ao longo das várias tentativas realizadas com o objetivo de obter uma simulação cujos resultados fossem coerentes, foram alterados vários fatores. Estes fatores incluem: o processo de desenho do modelo a simular, que apesar de ser o mesmo desenho tentou-se vários processos para atingir o desenho final; a malha no rotor, foram tentadas inúmeras malhas diferentes nos dois rotores em causa; mudou-se a característica das chapas magnéticas que constituíam o rotor e o estator; as condições de arranque foram as mais variadas, desde impor uma velocidade constante ao motor desprezando a inércia e a carga até várias velocidades iniciais considerando a inércia do motor e mantendo um fator de carga equivalente ao estipulado.

Tratando-se de simulações numéricas em ambiente 3D baseadas no Método de Elementos Finitos, muitos dos erros só se revelavam ao fim de, aproximadamente, 96 horas de

tempo computacional decorrido. Tratando-se da simulação numérica de quatro modelos diferentes bastante tempo foi despendido na detecção de erros e no aperfeiçoamento dos modelos.

Uma vez que não existe a certeza absoluta da exatidão dos resultados das simulações referentes ao rotor 3 e ao rotor 4 optou-se por não divulgar os mesmos. Mesmo com as dificuldades encontradas nas simulações numéricas optou-se por se avançar no trabalho inicialmente proposto: construção dos protótipos dos rotores e a realização dos ensaios laboratoriais.

Capítulo 5

Resultados Laboratoriais

5.1. Preparação e Construção de Protótipos

Durante a execução do trabalho realizado no âmbito da presente dissertação foi necessária a construção de quatro rotores diferentes. Os quatro rotores construídos e ensaiados são os mesmos que estão especificados nas secções 3.4.1.1 e 3.4.1.2.

O rotor com barras inclinadas sem anel intermédio não necessitou de nenhum cuidado extra durante a sua construção uma vez que o mesmo é o rotor padrão, utilizado na produção em série do modelo do motor escolhido na secção 3.1.

Em relação ao rotor com barras direitas sem anel intermédio, o processo de fabrico também foi relativamente simples. O mesmo foi em tudo semelhante à construção do rotor padrão, apenas foi necessário mudar a inclinação para 0°.

O desafio de construção foi significativamente maior para os rotores com anel intermédio. O processo começou com o desenho da chapa do rotor responsável por formar o anel intermédio. Esta etapa foi realizada, de forma parcial, durante o processo de dimensionamento do anel intermédio (secção 3.4.3.1). Sendo que para tornar o processo de fabrico viável foi necessário o cálculo de cotas que eram dispensáveis anteriormente.

Depois de o desenho técnico estar pronto, seguiu-se o processo de corte da chapa. Uma vez que apenas era necessária uma quantidade reduzida de chapas o processo de corte das chapas foi realizado numa máquina de corte a laser. Caso se optasse pelo corte utilizado no processo normal de fabricação do motor, seria necessário a construção de uma nova ferramenta de estampagem, o que seria mais moroso não trazendo nenhuma vantagem ao processo. As chapas de aço do anel intermédio foram tratadas termicamente da mesma forma das demais chapas do rotor. As chapas tanto do anel intermédio, como a utilizada no restante pacote estão ilustradas nas fig. 5.1 e fig. 5.2, respetivamente.

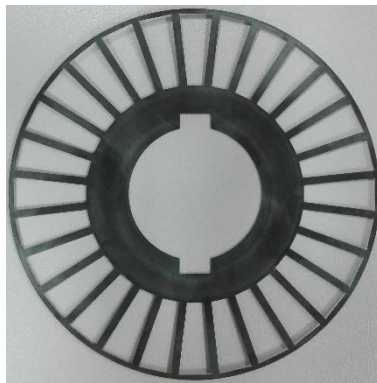


Figura 5.1 - Chapa do anel intermédio [Fonte: Autor]

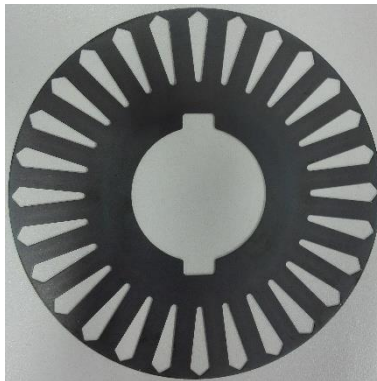


Figura 5.2 - Chapa utilizada no restante pacote [Fonte: Autor]

O processo de montagem do pacote dos rotores com anel intermédio foi realizado de forma manual. Houve um esforço constante de respeitar as medidas dos rotores que foram simulados no *software* de elementos finitos para que as comparações possam ser realizadas da forma mais direta possível.

No final, todos os rotores fabricados (fig. 5.3) e ensaiados no âmbito desta dissertação utilizaram materiais com as mesmas características eletromagnéticas, apenas alterando o formato da gaiola de esquilo. Assim, foram limitadas as diferenças entre os rotores ensaiados à estrutura da gaiola de esquilo (incluindo o anel intermédio como parte da gaiola de esquilo).



Figura 5.3 - Rotores construídos e ensaiados. Rotores 1, 2, 3 e 4 (da esquerda para a direita) [Fonte: Autor]

5.2. Apresentação Sumária dos Resultados

Os resultados dos ensaios laboratoriais são apresentados de seguida, os mesmo foram realizados tendo em conta todas as condições definidas na secção 3.3. Os resultados são relativos aos quatros rotores avaliados. Todos os rotores foram ensaiados no mesmo laboratório e nas mesmas condições.

Todos os resultados dos ensaios laboratoriais estão reunidos e resumidos na tabela 5.1, na tabela 5.2 e na tabela 5.3.

Tabela 5.1 - Resumo dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais (ensaio de tipo)

Grandezas	Rotor 1	Rotor 2	Rotor 3	Rotor 4
Potência Absorvida (W)	6185,00	6115,05	6143,91	6194,08
Corrente em Carga (A)	12,04	11,67	11,8	12,01
Corrente em Vazio (A)	6,09	5,89	5,97	5,96
Velocidade (rpm)	1742,8	1745,5	1743,1	1738,0
Perdas no Ferro (W)	93,17	84,84	81,47	91,07
Perdas Mecânicas (W)	19,73	21,33	19,62	18,19
PJ 1 (W)	344,06	314,89	328,65	344,73
PJ 2 Fund. (W)	182,16	172,61	180,83	197,79
Perdas Suplementares (W)	49,82	24,68	36,61	45,57
Perdas Totais (W)	687,75	617,13	645,99	696,16
Rendimento (%)	88,88	89,91	89,49	88,76
Fator de Potência	0,781	0,796	0,791	0,784
Potência Mecânica Útil (W)	5497,23	5498,04	5498,19	5497,87
Elevação de Temperatura (°C)	65,8	55,9	56,6	61,0

Tabela 5.2 - Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de ruído (em carga)

Grandezas		Rotor 1	Rotor 2	Rotor 3	Rotor 4
Ruído (dBA)	Posição 1	off	56,8	57	57,1
		on	58,1	62,7	60,4
	Posição 2	off	57,0	57,5	57,3
		on	59,3	63,1	60,9
	Posição 3	off	56,9	56,8	56,8
		on	58,5	62,6	60,5

Tabela 5.3 - Resultados obtidos nos ensaios de vibração (em carga)

Grandezas		Rotor 1	Rotor 2	Rotor 3	Rotor 4
Vibração (mm/s)	Vertical	off	0,462	0,161	0,266
		on	0,518	0,280	0,395
	Horizontal	off	0,295	0,375	0,380
		on	0,647	0,797	0,691

A tabela 5.1, a tabela 5.2 e a tabela 5.3 necessitam de alguma explicação relativas às grandezas mencionadas. Uma vez que se irá proceder à comparação entre os resultados das simulações numéricas e dos ensaios laboratoriais é necessário estabelecer a relação entre algumas dessas grandezas.

A grandeza denominada por ‘Corrente em Carga’ diz respeito ao valor eficaz da corrente em cada uma das fases do estator. Mais uma vez, ‘PJ 1’ são as perdas por efeito de Joule no estator e ‘PJ 2 Fund.’ são as perdas por efeito de Joule no rotor causadas pela componente fundamental da corrente rotórica. O aumento de temperatura do motor enquanto este está sujeito ao fator de carga estipulado é expresso pela grandeza ‘Elevação de Temperatura’. A grandeza ‘Perdas Suplementares’ inclui algumas perdas parasitas como aquelas originadas por alguns harmónicos de corrente, parte do fluxo magnético de fugas e outras componentes. É o resultante de cálculos e correções descritos na norma citada na secção 3.3.1.

Por fim, e já como foi mencionado na secção 4.1 seria necessário fazer algumas adaptações para que seja possível comparar as ‘Perdas no Ferro’ dos ensaios laboratoriais com as ‘Core Loss’ das simulações, uma vez que as primeiras incluem outras componentes de perdas. Esta diferença entre duas componentes que, teoricamente, representam a mesma grandeza deve-se à maneira como as perdas são medidas durante o ensaio. Apesar da existência da diferença ainda é possível comentar sobre a sua tendência entre os rotores em análise.

Relativamente à tabela 5.2 e à tabela 5.3 a única explicação necessária será referente à coluna onde está escrito ‘on’ e ‘off’. Para uma perceção mais prática a descrição do ensaio foi realizada na secção 3.3.3. Os resultados expressos nas linhas que se encontram identificadas com ‘on’ significa que foram recolhidos com os dois motores do ensaio em oposição ligados e

acoplados, já os resultados que se encontram nas linhas identificadas com ‘off’ foram recolhidos com os dois motores acoplados, mas mantendo o motor em ensaio (fora da caixa) desligado. Esta medição de resultados permite distinguir entre o ruído e as vibrações de origem eletromagnética e o de origem mecânica.

Explicações mais pormenorizadas e medições adicionais dos ensaios de ruído e vibração estão expressos no anexo A e B.

Feitas estas considerações, é possível agora proceder a uma análise completa e direta entre os resultados laboratoriais e os resultados das simulações numéricas. Devido à não completude das simulações numéricas as comparações serão feitas também com as previsões teóricas expressas no capítulo 2. A estrutura da apresentação e análise dos resultados segue a seguinte lógica: na secção 5.3 irão ser comparados os resultados entre os ensaios laboratoriais e as simulações realizadas com sucesso, tendo o objetivo de validar os resultados das simulações; na secção 5.4 são apresentados todos os resultados dos ensaios com o objetivo de destacar a influência que a inclinação das barras e a introdução do anel intermédio tem sobre o desempenho do motor.

5.3. Comparação dos Resultados Laboratoriais com os Resultados das Simulações Numéricas

Nesta secção serão comparados os resultados dos ensaios laboratoriais e os resultados das simulações dos rotores 1 e 2. De modo a facilitar a comparação, as informações expressas na tabela 4.1, tabela 5.1 e tabela 5.2 irão ser expressas de uma forma mais prática através de gráficos e separada por grandezas.

Uma vez que não se teve acesso à informação relativa à temperatura do motor durante as simulações a análise dos resultados é iniciada por esta grandeza. A variação está expressa na fig. 5.4 (esquerda), e é possível observar que a elevação da temperatura é maior no rotor 1 do que no rotor 2, o que concorda com o facto defendido nos artigos científicos de que o rotor 2 (barras direitas) apresenta um rendimento maior do que o rotor 1 (barras inclinadas), conforme mostrado na fig. 5.4 (direita). A temperatura é inversamente proporcional ao rendimento de um motor é possível, pois uma parte considerável das perdas dissipa-se na forma de calor.

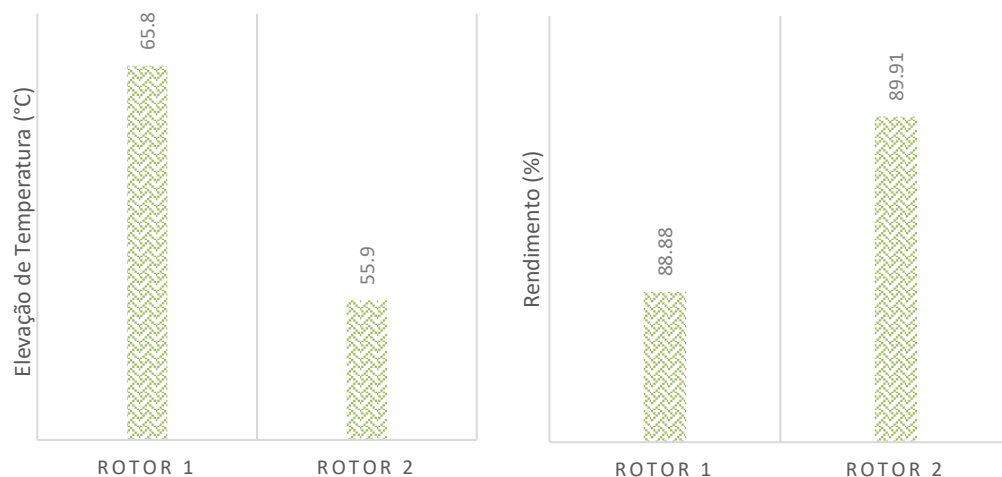


Figura 5.4 - Elevação de temperatura (esquerda) e rendimento (direita) dos ensaios laboratoriais dos rotores 1 e 2

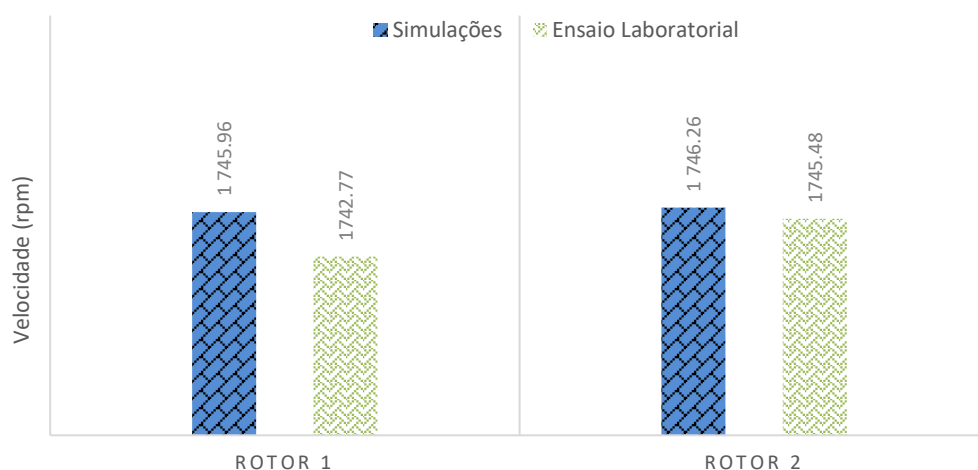


Figura 5.5 - Velocidade de rotação dos ensaios e simulações dos rotores 1 e 2

Relativamente à velocidade de rotação do motor (fig. 5.5) a tendência foi a mesma tanto na simulação como nos ensaios. O deslizamento tende a ser menor no rotor 2 (barras direitas), o que mais uma vez se encontra de acordo com o previsto pela teoria.

O comportamento das perdas por efeito de Joule originadas pela componente fundamental das correntes rotóricas (ver fig. 5.6) também manteve a mesma tendência que nas simulações, mas com diferença absoluta significativamente maior. Existem duas causas que justificam a maior diferença nos ensaios do que nas simulações: a primeira está ligada com a temperatura, admitindo que o rotor está na mesma temperatura que o restante do motor, então a resistência do rotor 1, se apenas se tiver em consideração a influência da temperatura, será maior do que a resistência do rotor 2, originando maiores perdas por efeito de Joule; a segunda causa são as correntes inter-barras, que foram desprezadas nas simulações e que contribuem para um aumento das perdas por efeito de Joule no rotor.

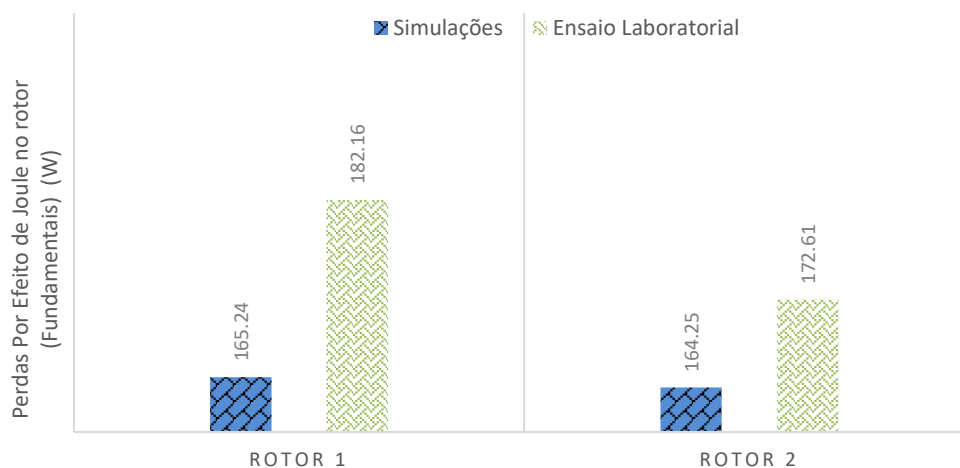


Figura 5.6 - Perdas por efeito de Joule (fundamental) dos rotores 1 e 2

A corrente estatórica (ver fig. 5.7) durante as simulações foi praticamente igual nos dois rotores. No entanto, durante o ensaio a corrente estatórica do motor com o rotor 2 foi menor do que com o rotor 1. Isto deve-se ao facto de a reatância equivalente do rotor ($x'2$) ser menor no rotor 2, e fazendo uma análise ao circuito equivalente presente na secção 2.4 é possível concluir que para a mesma potência mecânica total, é necessário uma corrente rotórica menor e por consequência uma corrente estatórica menor. A razão pela qual a $x'2$ diminui prende-se com o facto de esta ser definida pelas seguintes componentes: fluxo magnético que circula no entreferro (zig-zag), das características do pescoço da ranhura do estator, formato da ranhura do rotor e da inclinação das barras rotóricas. Sendo que para o rotor 2 a inclinação das barras é eliminada, consequentemente reduzindo o valor da reatância do rotor ($x'2$). Uma das razões para que a corrente estatórica se tenha mantido inalterada nas duas simulações, mesmo com a redução de $x'2$, deve-se ao facto de a temperatura ter sido a mesma nos dois casos.

Sendo que as perdas por efeito de Joule do estator são proporcionais ao quadrado da corrente nas bobinas, então são esperados os resultados expressos na fig. 5.8. A diferença entre os resultados das simulações numéricas e os resultados dos ensaios laboratoriais também tem a mesma explicação do que aquela referida no parágrafo anterior (diferença de temperatura).

Para as perdas no ferro (fig. 5.9) o que será comparado é a componente 'Perdas no Ferro' dos ensaios, com 'CoreLoss' das simulações numéricas. Como pode ser observado tanto nas simulações como nos ensaios laboratoriais houve a mesma tendência. Aparentemente a inclinação das barras irá provocar perdas adicionais no ferro do motor. Em termos de valores absolutos não é confiável comparar os ensaios e as simulações numéricas, uma vez que nos ensaios são incluídas alguns componentes harmónicos na componente de 'Perdas no Ferro'.

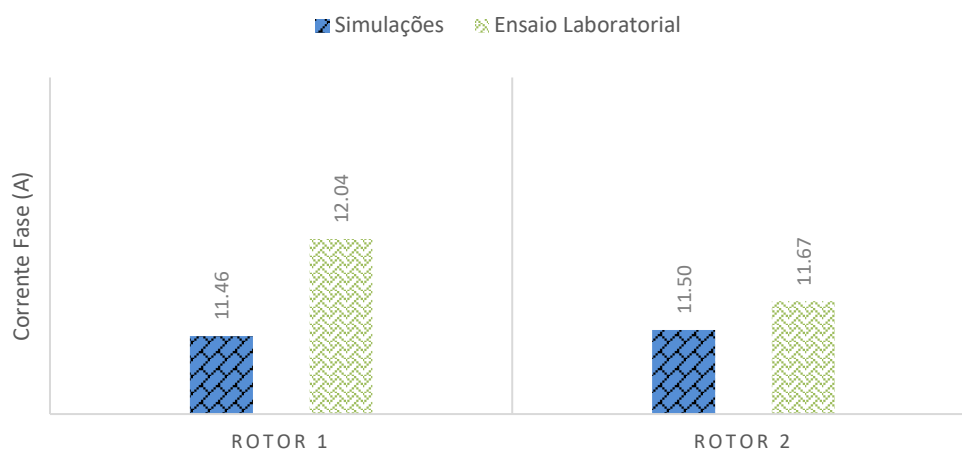


Figura 5.7 - Correntes por fase estática nos ensaios e simulações dos rotores 1 e 2

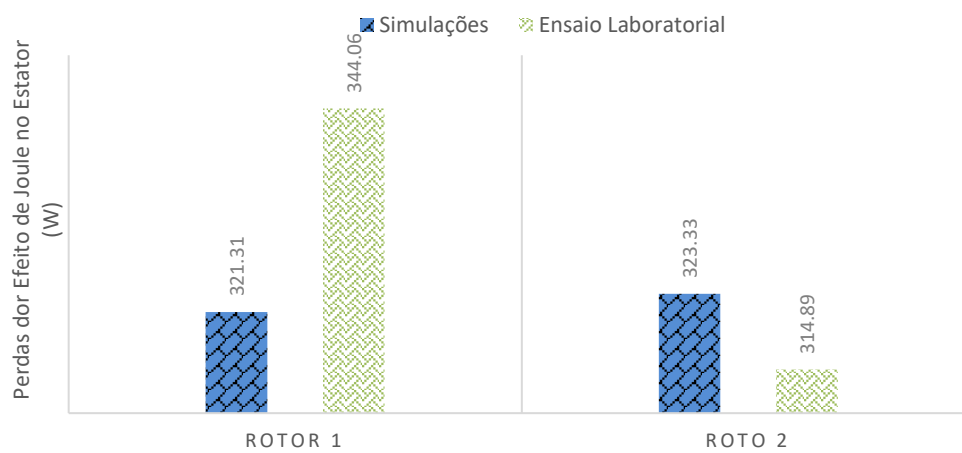


Figura 5.8 - Perdas por efeito de Joule nos ensaios e simulações dos rotores 1 e 2

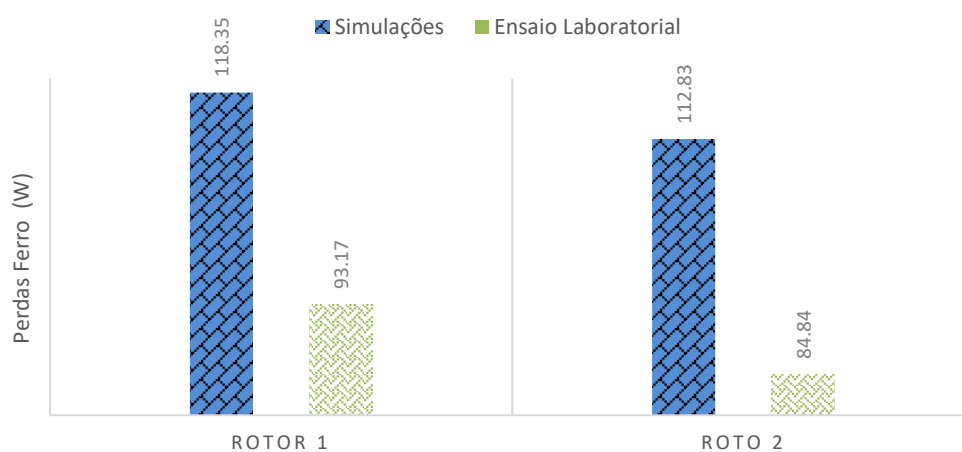


Figura 5.9 - Perdas no ferro nos ensaios e simulações dos rotores 1 e 2

5.3.1. Considerações finais da comparação dos resultados das simulações e dos ensaios laboratoriais.

Da análise completa à comparação entre os resultados obtidos por ensaios laboratoriais e simulações numérica é possível verificar que os resultados das simulações são coerentes com os resultados dos ensaios laboratoriais. As variações que o uso dos diferentes rotores provocaram nos resultados das simulações e dos ensaios laboratoriais são semelhantes. Esta semelhança prende-se apenas na direção da variação e não na magnitude da variação.

A inclusão da variação da temperatura e das correntes inter-barras nas simulações numéricas farão com que os resultados entre os ensaios e as simulações fiquem ainda mais coerentes e semelhantes em função da magnitude dos valores. No entanto as inclusões destas duas características iria tornar a execução das simulações impraticável dentro do período de tempo em que o trabalho foi realizado. Considerando as diferenças detetadas entre os resultados dos ensaios laboratoriais e das simulações numéricas, a temperatura utilizada nas simulações numéricas aproxima-se mais da temperatura de ensaio do rotor 2 do que do rotor 1. Portanto, espera-se que as perdas por efeito de Joule aumentem na simulação numérica do rotor 1, caso se repita a simulação numérica com a temperatura corrigida.

Apesar das possíveis melhorias, as simulações identificaram variações importantes em grandezas de relevância para o caso em estudo, nomeadamente, as perdas no ferro do motor, as perdas por efeito de joule no rotor provocadas pelos harmónicos da corrente do rotor e o deslizamento em regime estacionário. Para estas grandezas os resultados das simulações concordaram com as previsões teóricas.

Daqui é possível concluir que os parâmetros definidos na secção 3.2 tiveram o efeito desejado. Nomeadamente, os parâmetros escolhidos resultaram em simulações cujos resultados concordaram com os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais e com as previsões teóricas.

5.4. Análise dos Resultados dos Ensaios Laboratoriais

Nesta secção vão ser discutidos os resultados laboratoriais obtidos para os quatro rotores descritos na secção 3.4. Os rotores ensaiados tiveram em consideração os cuidados enumerados em 5.1. O resumo dos resultados analisados nesta secção estão expressos de forma organizada e condensada na tabela 5.1, tabela 5.2 e na tabela 5.3

Tal como aconteceu no Capítulo 4, é possível fazer uma comparação direta entre os resultados obtidos nos ensaios dos diferentes rotores uma vez que a potência útil desenvolvida nestes é praticamente a mesma. Neste caso específico a maior diferença entre dois dos ensaios foi de 0,02% da potência útil.

Uma vez garantida a validade da comparação direta dos resultados dos vários ensaios, é possível verificar que para os vários rotores a velocidade de rotação (fig. 5.10) em que o motor estabilizou sofre algumas alterações significativas. A velocidade de rotação será tanto maior (considerando a mesma carga mecânica) quanto maior for o fluxo magnético que influencia as barras. A inclinação das barras diminuirá corrente elétrica induzida nestas, uma vez que as barras já não se encontram perpendiculares relativamente ao fluxo magnético. No caso da introdução do anel intermédio a área de alumínio até sofre um aumento, no entanto a corrente induzida neste não contribui para a produção de binário pois terá uma direção próxima à perpendicular do veio.

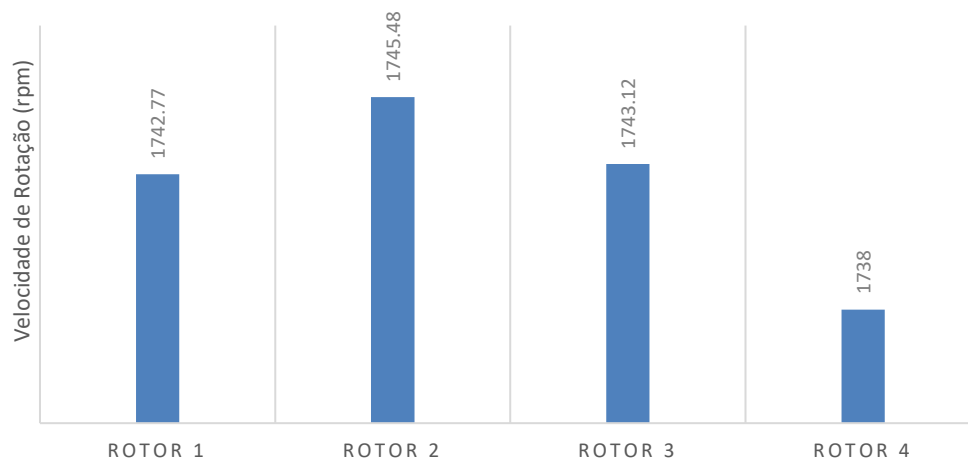


Figura 5.10 - Velocidade de rotação dos vários rotores para a carga estipulada

Tal como explicado na secção 4.2, mantendo a mesma carga para todos os rotores, o deslizamento será maior para aqueles rotores com uma indução menor de correntes nas barras da gaiola de esquilo. Uma vez que as perdas por efeito de Joule no rotor provocadas pela componente fundamental da corrente aumentam com o deslizamento, sendo que na fig. 5.10 e na fig. 5.11 é possível verificar esta correlação. Também se verifica uma tendência para o aumento das perdas por efeito de joule no rotor quando se introduz o anel intermédio.

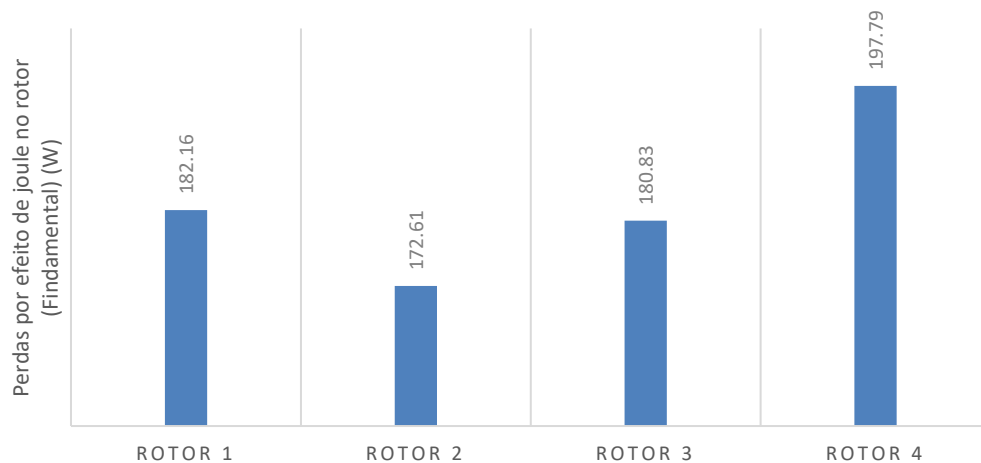


Figura 5.11 - Perdas por efeito de Joule no rotor provocadas pela componente fundamental da corrente

Na fig. 5.12 é visualizada a corrente por fase no estator do motor para os diferentes casos. Aqui verifica-se uma tendência para que a corrente de fase seja maior quando se inclina as barras, sendo que isto acontece havendo ou não anel intermédio no rotor. Isto acontece pois, a corrente de fase irá aumentar caso $x'2$ aumente, uma vez que a potência útil se manteve constante, e como já foi visto anteriormente, a inclinação das barras irá fazer com que a reatância de fugas por fase equivalente do rotor aumente. A introdução do anel intermédio também irá contribuir para aumentar a reatância de fugas por fase equivalente do rotor ($x'2$), registando-se esse aumento apenas nos rotores com barras direitas. Nos rotores com barras inclinadas o mesmo não se verificou, uma hipótese para isso é que estando as barras inclinadas de maneira diferente nos dois rotores, no rotor 4 o aumento de $x'2$ devido à inclinação das barras tenha sido menor do aquele registado no rotor 1, ao mesmo tempo que o aumento provocado pelo anel intermédio não seja o suficiente para compensar essa diferença. Observando a diferença entre o rotor 2 e o rotor 3, a introdução do anel intermédio tende a aumentar menos a corrente por fase (e portanto $x'2$) do que a inclinação das barras (diferença entre rotor 1 e rotor 2).

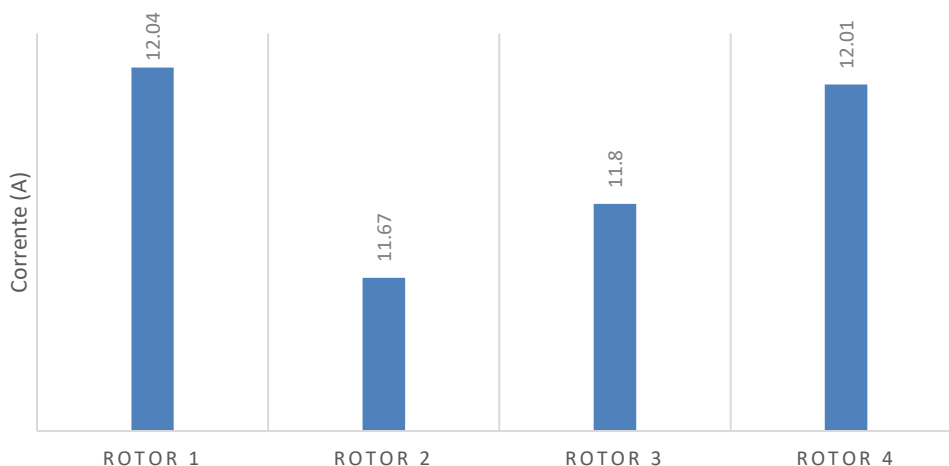


Figura 5.12 - Corrente por fase no estator nos ensaios dos vários rotores

Uma vez analisada a variação da corrente por fase em cada ensaio dos diferentes rotores, a análise das perdas de Joule no estator é simples, uma vez que a relação entre as duas é direta. Portanto é de esperar que correntes maiores gerem mais perdas por efeito de Joule, e é o que se verifica ao comparar os resultados laboratoriais expressos na fig. 5.12 e na fig. 5.13. O aumento das perdas estatóricas por efeito de Joule irá provocar uma elevação maior da temperatura em que se dá a estabilização térmica do motor, o que por sua vez irá gerar um aumento nas resistências do motor provocando ainda mais perdas e alterando os valores das correntes.

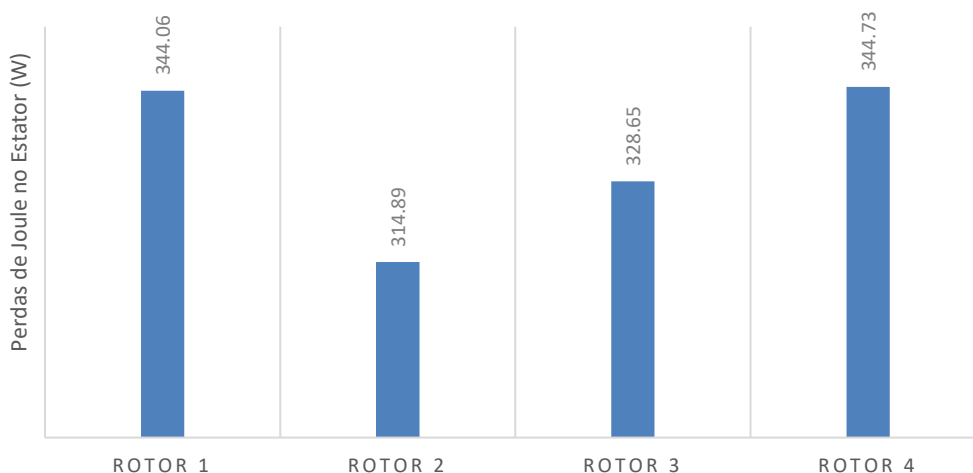


Figura 5.13 - Perdas de Joule no estator nos ensaios dos vários rotores

Nas perdas no ferro (fig. 5.14) é possível verificar algumas tendências tanto provocadas pelo anel intermédio como pela inclinação das barras. Relativamente à introdução do anel intermédio, é possível verificar uma tendência na queda das perdas no ferro em relação aos rotores sem anel intermédio. No entanto esta queda é bastante reduzida, podendo ser propostas duas causas: a primeira é que, como a diferença é de apenas alguns watts dentro de

um sistema de alguns milhares de watts, a diferença seja apenas originada pela incerteza de medição; a segunda causa seria o facto de com a introdução do anel intermédio, o volume de ferro utilizado no rotor é reduzido conduzindo a uma redução de perdas no ferro, no entanto, esta redução teria que ser pequena o suficiente para não provocar a saturação magnética do ferro e originar mais perdas.

Relativamente à inclinação das barras é possível verificar que existe uma tendência para que as perdas no ferro aumentem quando as barras são inclinadas, independentemente de o rotor ter ou não um anel intermédio. Tais resultados estão de acordo com o que se previa anteriormente nos artigos científicos e patentes industriais.

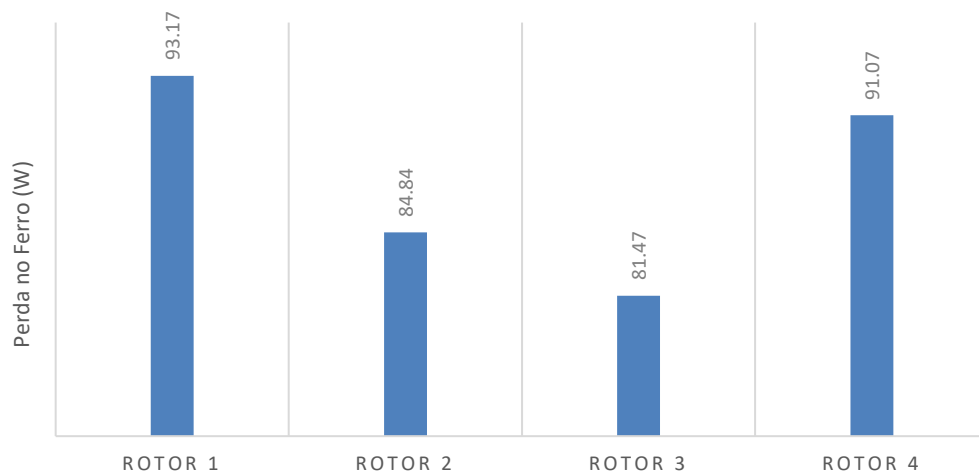


Figura 5.14 - Perdas no ferro do motor nos ensaios dos vários rotores

As restantes componentes de perdas do motor, nomeadamente, perdas mecânicas e perdas suplementares estão representadas graficamente na fig. 5.15 e fig. 5.16, respetivamente. Nas perdas mecânicas, a maior variação é, entre os dois casos mais extremos, de aproximadamente 3 watts e portanto influenciará muito pouco no desempenho dos motores. Para além disso, como cada rotor utiliza rolamentos diferentes e apresenta uma equilibragem diferente, a variação das perdas mecânicas não depende diretamente do formato da gaiola de esquilo utilizada.

Recordando o que foi mencionado na secção 5.2, as perdas suplementares resultam de correções matemáticas e de algumas aproximações descritas na norma citada na secção 3.3.1. Tendo em consideração o que realmente representa as perdas suplementares no funcionamento do motor é possível verificar algumas tendências. Mais uma vez, a inclinação das barras, aparentemente, aumenta esta componente das perdas de uma forma considerável. Já o efeito originado pela introdução do anel intermédio não é claro. Uma vez que a introdução do anel intermédio faz com que, caso o rotor tenha barras direitas (comparação entre o rotor 2 e 3), as perdas suplementares aumentem, já no caso de o rotor ter barras inclinadas (comparação

entre o rotor 1 e 4), as perdas suplementares mantêm praticamente inalteradas, sendo que como a variação é pequena pode ser apenas aparente (causada por incerteza da medição).

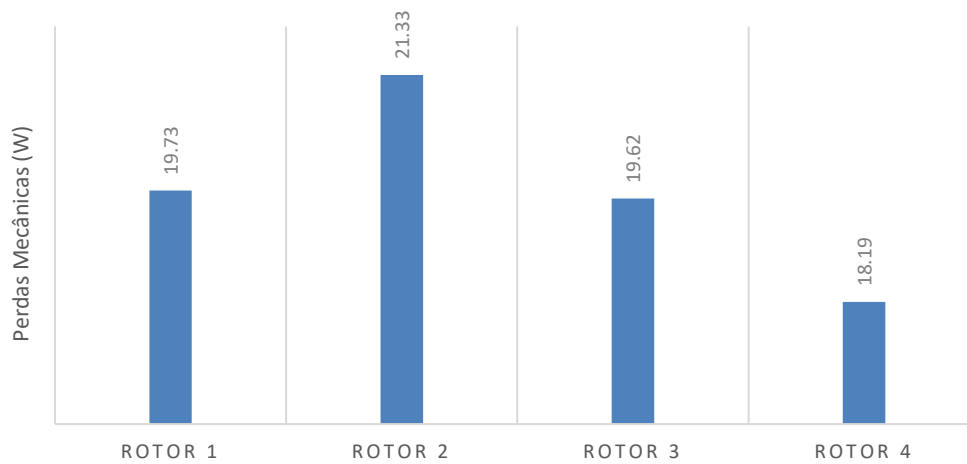


Figura 5.15 - Perdas mecânicas do motor nos ensaios dos vários rotores

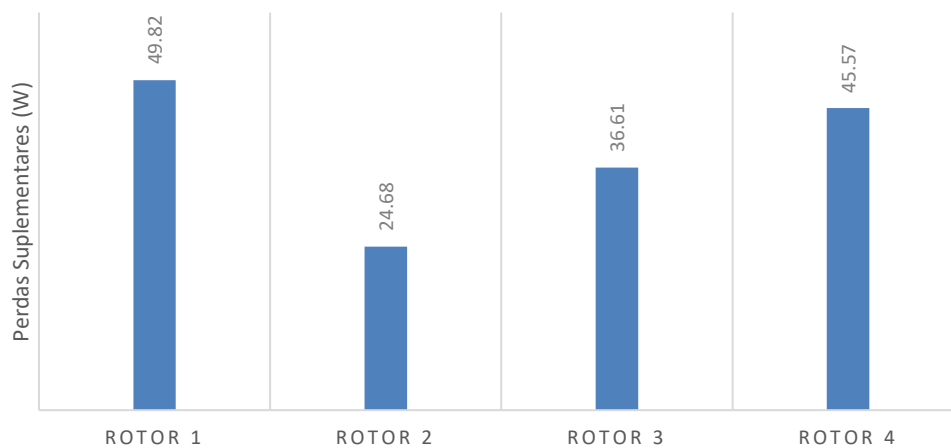


Figura 5.16 - Perdas suplementares do motor nos ensaios dos vários rotores

Uma vez que todas as componentes das perdas já foram apresentadas (da fig. 5.11 à fig. 5.16) é relevante apresentar as perdas totais do motor para os diferentes rotores (fig. 5.17) para que seja possível discutir de forma apropriada grandezas como a elevação da temperatura e o rendimento. Na fig. 5.17 é possível verificar, tal como se previa, que o rotor 2 é o que apresenta menores perdas. E portanto os resultados demonstram que tanto a inclinação das barras como a introdução do anel intermédio tende a aumentar as perdas do rotor. As perdas totais são bastantes semelhantes no rotor 1 e no rotor 4. É pertinente recordar que em [2] era defendido que o rotor 4 era uma solução cujo objetivo seria maximizar o rendimento do motor mantendo baixo o conteúdo harmónico do fluxo magnético no entreferro.

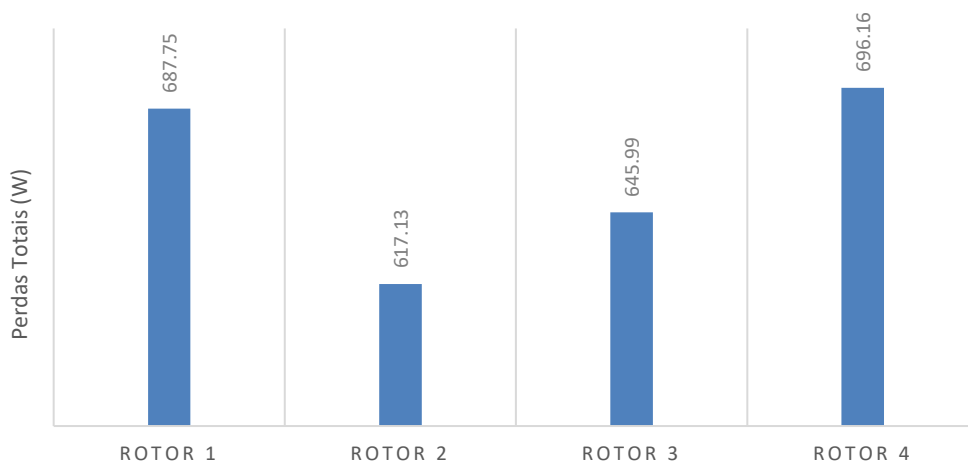


Figura 5.17 - Perdas totais do motor nos ensaios dos vários rotores

Uma vez que uma grande parte das perdas se dissipa em forma de calor é esperado que haja uma relação entre a elevação da temperatura e as perdas totais do motor. Essa relação verifica-se nos rotores ensaiados. A própria elevação de temperatura irá afetar os valores das resistências elétricas que por sua vez provocam um aumento das perdas por efeito de Joule.

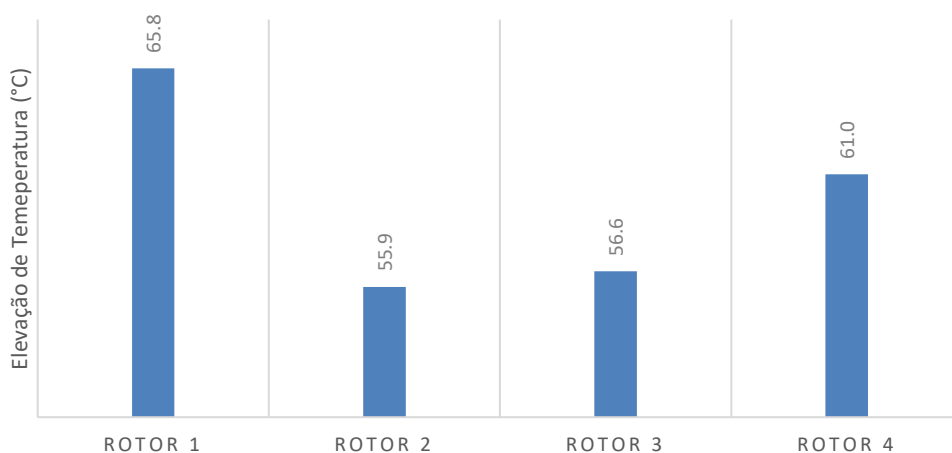


Figura 5.18 - Elevação de temperatura do motor nos ensaios dos vários rotores

Como se pode verificar pela análise à fig. 5.18, a elevação da temperatura nos motores para os diferentes rotores varia de forma significativa, e portanto caso fosse considerada esta diferença nas simulações numéricas os resultados das mesmas seriam afetados, aproximando-se assim, ainda mais dos resultados dos ensaios.

Outra grandeza que está amplamente ligada às perdas totais é o rendimento (fig. 5.19), considerando ainda que os motores se encontram todos em pontos de carga semelhantes. Neste ponto é possível verificar mais uma vez que aparentemente o anel intermédio não provocou o efeito antecipado no artigo científico [2], uma vez que era esperado que o anel intermédio fizesse com que o rotor 4 tivesse melhor rendimento que o rotor 1. Em relação à variação do

rendimento entre os vários rotores, as mesmas foram significantes chegando a ser maiores do que 1%. O efeito da inclinação das barras corresponde, como esperado em [2], à diminuição do rendimento do motor independentemente de existir anel intermédio ou não.

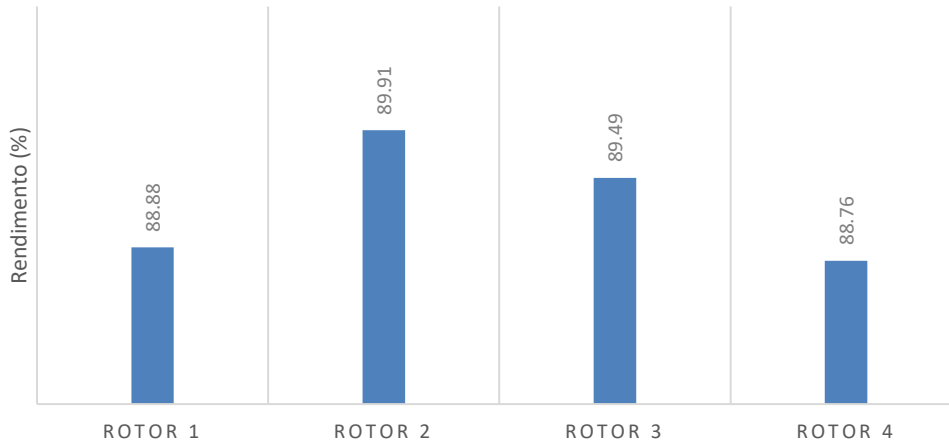


Figura 5.19 - Rendimento do motor nos ensaios dos vários rotores

Em [2] também existe a informação de que o anel intermédio iria piorar o fator de potência (fig. 5.20) do motor. O anel intermédio deveria ter esse efeito uma vez que contribui para o aumento de $x'2$ no circuito equivalente do motor. No entanto, o efeito que o anel intermédio produz sobre o fator de potência não é significativo. Por outro lado, a inclinação das barras piora o fator de potência tanto nos rotores com anel intermédio como nos rotores sem anel intermédio.

Depois de analisadas todas as grandezas elétricas do motor, o rotor 2 apresenta as melhores características de funcionamento. Este resultado era esperado da teoria, uma vez que a inclinação das barras e a introdução do anel intermédio têm como objetivo a redução das vibrações e do ruído produzido pelo motor através da redução da distorção harmónica do fluxo magnético no entreferro, provocando uma queda no rendimento. No entanto, o rotor 3, que contém um anel intermédio, apresenta características elétricas melhores do que o rotor 1 o que poderá indicar que é uma solução interessante.

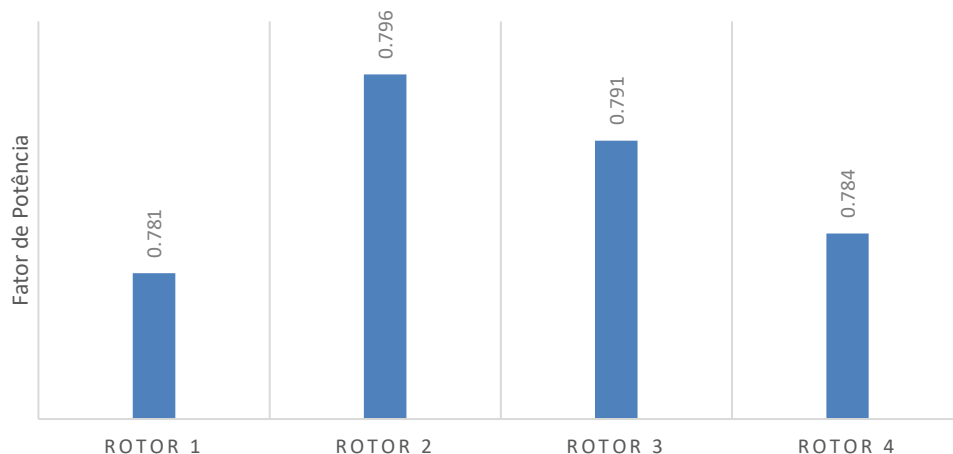


Figura 5.20 - Fator de potência do motor nos ensaios dos vários rotores

Uma característica importante no desempenho do motor é a curva de binário desenvolvido em função da velocidade de rotação (fig. 5.21).

No binário, representado na fig. 5.21, é notória a divisão dos quatro rotores em dois grupos distintos. A característica que distingue os dois grupos é o facto de as barras rotóricas apresentarem ou não uma inclinação, apesar de o anel intermédio também produzir diferenças relevantes na curva de binário, nomeadamente na zona onde o deslizamento é alto (baixa velocidade de rotação).

Em relação aos rotores com barras inclinadas verifica-se uma aparente redução no binário máximo desenvolvido e no binário de arranque, quando comparados com os rotores com barras direitas.

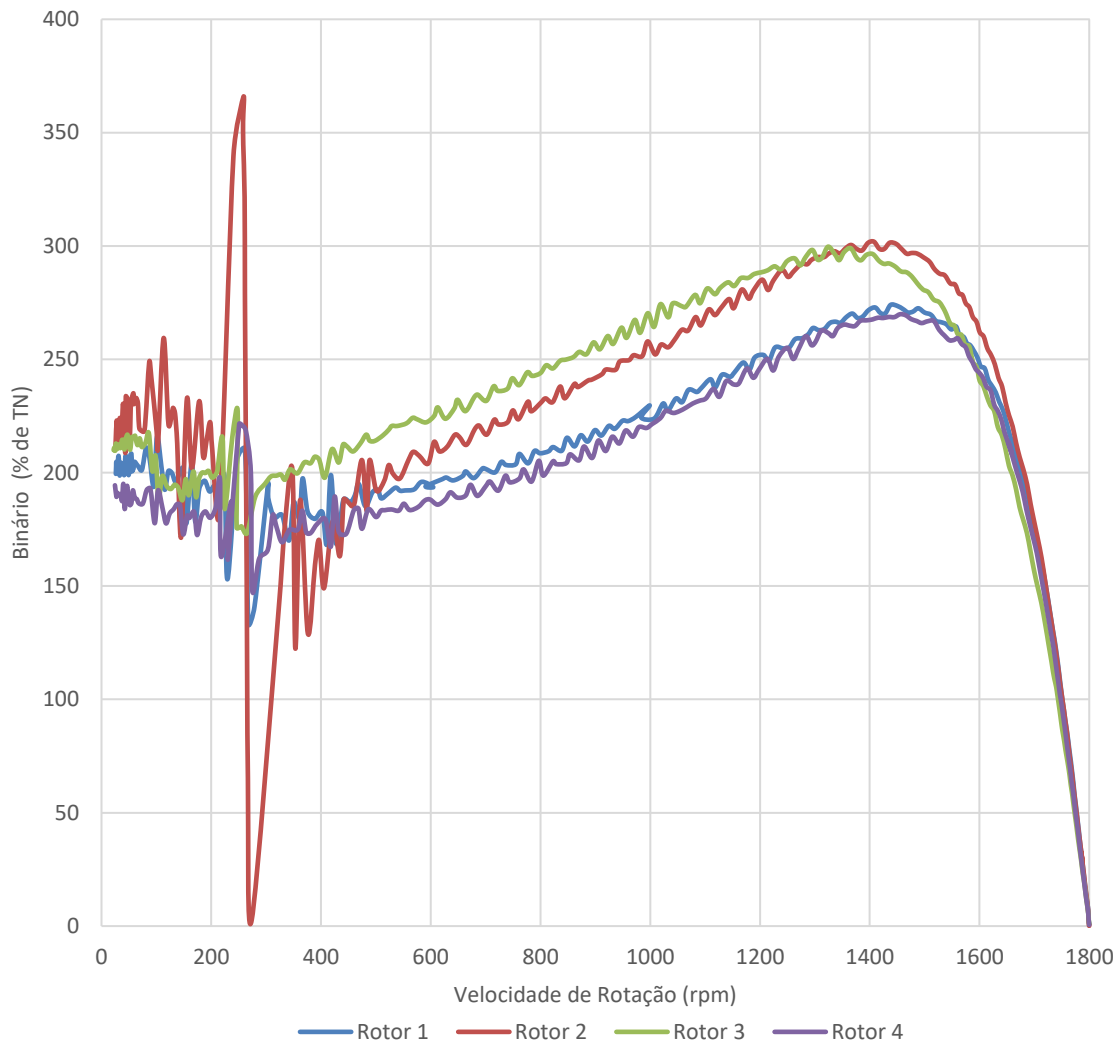


Figura 5.21 - Curva de binário desenvolvido versus a velocidade de rotação nos ensaios dos vários rotores

Nos rotores sem anel intermédio, a inclinação das barras tem o efeito de atenuar os efeitos dos harmónicos que afetam o binário. Como se pode verificar na fig. 5.21 o rotor 2 apresenta uma grande influência dos harmónicos, o que irá reduzir o número de aplicações em que o motor poderá ser aplicado, nomeadamente aplicações em que o arranque seja feito em carga, correndo o risco de não ter a capacidade de arrancar. Mas, no que se refere a eliminar o efeito dos harmónicos no binário, a introdução do anel intermédio nos rotores com barras direitas (rotor 3) aparenta mitigar estes efeitos de uma forma mais eficaz do que a inclinação das barras, sem reduzir consideravelmente o binário máximo e o de arranque. Para além dos benefícios referido anteriormente, a introdução do anel intermédio no rotor com barras direitas também irá melhorar o binário desenvolvido na zona de elevado deslizamento. Isto leva a crer que a introdução do anel intermédio provocou um aumento em R2. Nos rotores com anel intermédio, a inclinação das barras, aparentemente apenas produz efeitos negativos à curva de binário.

Em [8] é conjecturada a possibilidade de o rotor 1 e o rotor 4 terem uma curva de binário mais favorável do que as curvas de binário do rotor 2 e do rotor 3, na área da curva referente a um alto deslizamento. Os resultados obtidos pelos ensaios laboratoriais não corroboraram esta hipótese.

Agora que os dados relativos ao binário produzido pelo motor também já foram analisados é possível verificar que o rotor 2, apesar de demonstrar excelentes características elétricas, apresenta uma curva de binário que pode limitar bastante o uso de motores com este tipo de rotor. O rotor 3 demonstrou uma curva de binário com características bastantes interessantes, nomeadamente no que se refere ao binário máximo, ao binário de arranque e ao comportamento do binário na zona em que o deslizamento é elevado. Já o rotor 1 e o rotor 4 apresentaram curvas de binário bastante semelhantes, levantando a possibilidade de que o anel intermédio em rotores com barras inclinadas não terá nenhum efeito significativo sobre a curva de binário.

Resta analisar os resultados dos ensaios de ruído e vibração. Como não há uma norma que especifique sobre a realização do ensaio de ruído e vibração com o motor em carga, estão descritos nos anexos A e B os procedimentos dos ensaios realizados neste trabalho.

No que diz respeito ao ensaio de vibração os dados estão representados graficamente na fig. 5.22. Com os valores obtidos de vibração é difícil observar um padrão significativo para os diferentes rotores. Os níveis de vibração para todos os rotores foram muito baixos (menores do que 1 mm/s), indicando que os rotores estavam bem equilibrados e os motores bem alinhados. A diferença entre os rotores pode ser considerada até mesmo ruído de medição. Portanto, para motores desta dimensão e desta gama de potência, os rotores ensaiados não aparentam produzir uma mudança significativa relativamente à vibração.

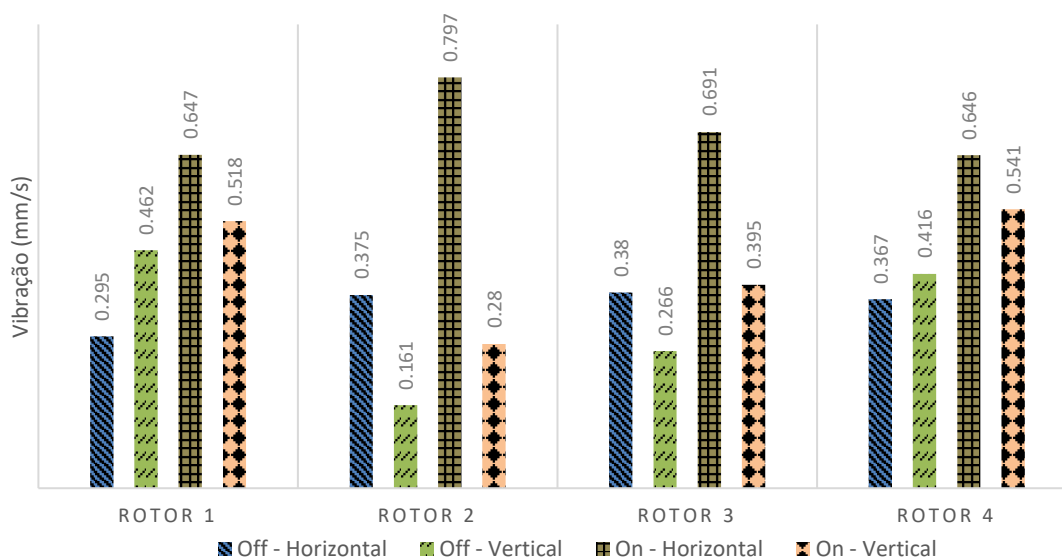


Figura 5.22 - Resultados do ensaio de vibração produzida pelos vários rotores

Já no que se refere ao ruído o tipo de rotor utilizado aparenta ter uma influência bastante significativa. Os resultados dos ensaios de ruído estão representados graficamente na fig. 5.23. De modo a tornar o gráfico mais inteligível, a explicação do significado de cada coluna para cada um dos rotores será feita. Em cada um dos rotores, a coluna mais à esquerda diz respeito ao ruído produzido quando apenas o motor que se encontra dentro da caixa está a funcionar, desacoplado do motor de ensaio. A coluna do meio diz respeito ao ruído produzido quando apenas o motor que se encontra dentro da caixa está a funcionar, acoplado com o motor de ensaio, portanto esta coluna capta o ruído mecânico produzido pelo motor de ensaio. O ruído mecânico inclui principalmente o ruído produzido pelo ventilador e pelos rolamentos. A coluna mais à direita diz respeito ao ruído produzido quando o motor dentro da caixa e o motor em ensaio estão ligados e acoplados, portanto esta coluna quantifica o ruído mecânico do motor em ensaio assim como o ruído com origem eletromagnética do mesmo. Os valores apresentados na fig. 5.23 são a média logarítmica dos valores registados para cada uma das posições consideradas. Os valores em cada uma das posições estão expressos na tabela 5.2 e uma explicação sobre estes pontos pode ser encontrada no Anexo A. Na tabela 5.4 podem ser encontradas as diferenças logarítmicas entre o ruído com origem mecânica (colunas do meio na fig. 5.23) e o ruído com origem mecânica e eletromagnética (colunas à direita na fig. 5.23), assim pretende-se isolar apenas o ruído com origem eletromagnética produzido por cada um dos rotores ensaiados.

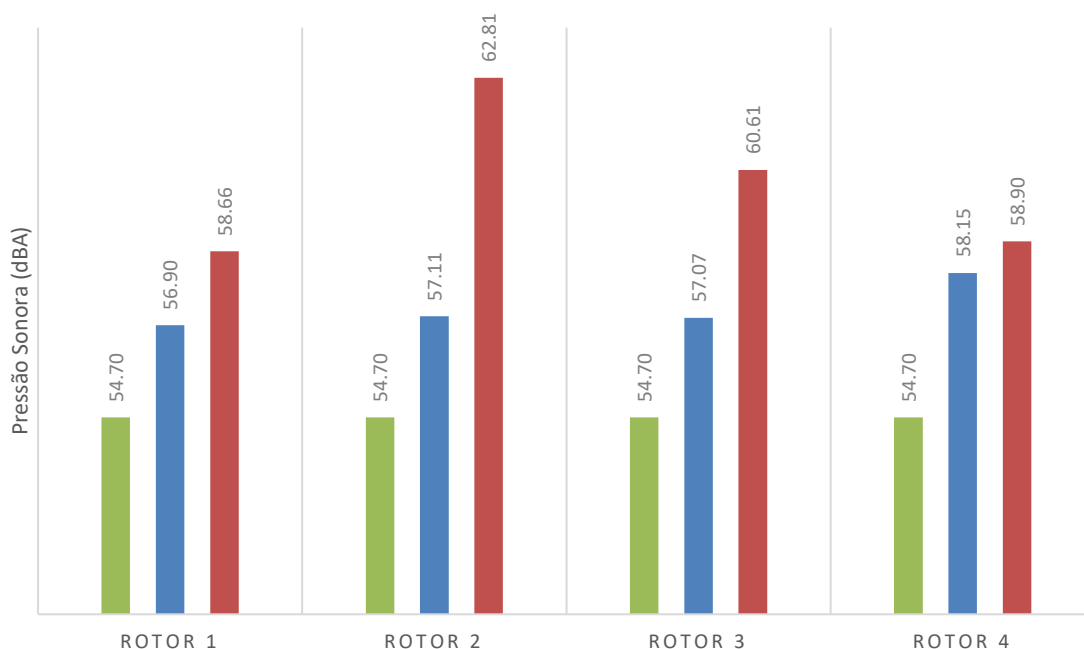


Figura 5.23 - Resultados do ensaio de ruído (média das 3 posições consideradas) produzido pelos vários rotores

Tabela 5.4 - Ruído com origem eletromagnética produzido pelos vários rotores

Rotor	Pressão Sonora (dBA)
Rotor 1	53.89
Rotor 2	61.44
Rotor 3	58.06
Rotor 4	50.94

O rotor 2 é o caso em que o ruído eletromagnético é o mais elevado, tal era antecipado pela bibliografia e pelos resultados das simulações numéricas, já que o elevado ruído eletromagnético indica que o conteúdo harmónico do fluxo magnético no entreferro é maior.

O anel intermédio e a inclinação das barras influenciam significativamente no ruído eletromagnético do motor. A inclinação das barras, tanto nos rotores com ou sem anel intermédio, reduz de forma relevante o nível de ruído eletromagnético

No caso o anel intermédio também produziu o efeito que a literatura técnica previa, tanto nos rotores com barras direitas como nos rotores com barras inclinadas. Em ambos os casos a introdução do anel intermédio aparenta resultar numa redução do ruído eletromagnético, e, portanto, é possível deduzir que o anel intermédio tenha um efeito significativo na redução dos harmónicos no fluxo magnético no entreferro. O rotor 4 (barras inclinadas com anel intermédio) aparenta ser a solução ideal para a redução do ruído do motor. Já o rotor 3 aparenta ser uma solução intermédia, uma vez que os resultados demonstraram que o ruído produzido por este é menor do que o ruído eletromagnético produzido pelo rotor 2 ao mesmo tempo que é maior do que o ruído eletromagnético produzido pelo rotor 1 e pelo rotor 4.

Após a análise de todos os dados e resultados disponíveis dos rotores ensaiados, é possível verificar os pontos fortes e os pontos fracos de cada uma das soluções.

O rotor 1 (barras inclinadas) é a solução atual utilizada na grande maioria dos motores de indução com gaiola de esquilo. Esta solução não apresenta as melhores características em nenhuma das grandezas avaliadas (grandezas elétricas, binário, ruído e vibração). No entanto, apresenta um melhor equilíbrio entre todas as grandezas, sendo que relativamente ao ruído produzido é onde apresenta maior vantagem.

O rotor 2 (barras direitas) é uma solução raramente utilizada atualmente. As suas características referentes ao ruído e ao binário apresentam desvantagens significativas em relação às outras soluções. No entanto esta solução apresenta o melhor rendimento elétrico de entre todas as soluções ensaiadas.

O rotor 3 (barras direitas com anel intermédio) aparenta apresentar características elétricas bastante interessantes, como melhoria significativa de rendimento em relação ao rotor 1. A curva de binário aparenta ser a mais interessante de entre as soluções ensaiadas, pois apresenta o segundo maior binário de arranque, as melhores características na zona de

alto deslizamento e o segundo maior binário máximo. Apresenta, no entanto, um ruído significativamente mais elevado do que a solução atualmente utilizada (rotor 1).

Por fim, o rotor 4 (barras inclinadas com anel intermédio) apresenta características elétricas e uma curva de binário bastante semelhante à do rotor 1. A única vantagem aparente desta solução é relativa ao ruído eletromagnético, que foi registado como sendo o mais baixo de todas as soluções testadas.

5.5. Considerações Finais em Relação à Inclinação das Barras

Os efeitos provocados pela inclinação das barras, tanto nos rotores com anel intermédio ou sem anel intermédio, estiveram de acordo com o que foi descrito nos artigos científicos e nas patentes industriais.

A inclinação das barras provocou um aumento de perdas por efeito de Joule, tanto no rotor (fig. 5.11), como no estator (fig. 5.13). As perdas no ferro também aumentaram nos rotores com barras inclinadas (fig. 5.14). Devido a este aumento generalizado nas perdas, a temperatura de estabilização térmica (fig. 5.18) também aumenta e o rendimento (fig. 5.19) diminui. A inclinação das barras também torna o fator de potência (fig. 5.20) menos favorável e o deslizamento (fig. 5.10) maior para a mesma carga. O binário de arranque e o binário máximo também sofre uma redução com a inclinação das barras (fig. 5.21).

Todas estas desvantagens descritas têm como objetivos a redução de ruído eletromagnético do motor. De facto esta redução foi verificada nos resultados do ensaio de ruído, e trata-se de uma redução, aparentemente, significativa. Através desta redução no ruído eletromagnético é possível deduzir que os harmónicos do fluxo magnético no entreferro também foram reduzidos assim como o *ripple* do binário também sofreu uma redução.

O único efeito que não foi verificado através dos resultados dos ensaios laboratoriais e dos resultados das simulações numéricas foi aquele indicado em [8]. Ou seja, a inclinação das barras não teve uma influência positiva no binário desenvolvido pelo motor para valores elevados de deslizamento.

5.6. Considerações Finais em Relação ao Uso do Anel Intermédio

Ao contrário do que se verificou com a inclinação das barras, em que o efeito se verificava independentemente de o rotor ter anel intermédio ou não. A influência do anel intermédio irá depender se o rotor tem barras inclinadas ou direitas.

Em relação aos rotores com barras direitas (rotor 2 e rotor 3) o anel intermédio provocou alguns dos efeitos antecipados pelos artigos científicos. Nomeadamente, a redução

de ruído com origem eletromagnética e a redução dos harmónicos do fluxo magnético no entreferro e a redução do rendimento. No entanto, o fator de potência, para o qual se esperava uma redução com o acréscimo do anel intermédio, manteve-se praticamente o mesmo.

Em rotores de barras direitas, a introdução de um anel intermédio ou a inclinação das barras têm efeitos bastantes semelhantes. No entanto, o primeiro privilegia as características elétricas e a curva do binário em detrimento de uma redução menor no ruído eletromagnético produzido; já o segundo privilegia a redução do ruído eletromagnético em detrimento de uma maior degradação das características elétricas e da curva de binário.

Os rotores com barras inclinadas pouco sentiram a influência da introdução do anel intermédio, o que resultou em características idênticas para o rotor 1 e o rotor 4. As alterações esperadas pelos artigos científicos não foram replicadas totalmente nos resultados obtidos pelos ensaios laboratoriais. Apenas se verificou um aumento nas perdas de Joule no rotor (fig. 5.11). Em relação à curva de binário não se registou nenhuma diferença significativa entre o rotor 1 e o rotor 4. Em relação ao ruído eletromagnético houve uma diferença relevante entre os dois rotores. O rotor 4 (com barras inclinadas com anel intermédio) registou um ruído eletromagnético significativamente mais baixo do que aquele registado para o motor com o rotor 1. Portanto, o anel intermédio aparenta ter a capacidade de reduzir os harmónicos no fluxo magnético do entreferro de forma significativa de rotores com barras direitas ou barras inclinadas.

Capítulo 6

Conclusões

6.1. Conclusões

Relativamente às simulações numéricas executadas com sucesso no âmbito desta dissertação as mesmas foram parcialmente validadas pelos resultados laboratoriais, no entanto os efeitos provocados pelas diferenças de temperatura entre os dois casos de rotores comparados (rotor 1 e rotor 2) foram ignorados. Portanto, utilizar valores exatos em relação à temperatura é fundamental para que as simulações sejam validadas pelos resultados laboratoriais sem a necessidade de fazer extrapolação dos resultados das simulações para outras temperaturas.

Relativamente à inclinação das barras e à utilização do anel intermédio: as duas soluções têm uma influência bastante semelhante no rotor com barras direitas (rotor 2): ambas tendem a reduzir o ruído eletromagnético e a piorar as características elétricas. No entanto, a inclinação das barras é mais eficaz a reduzir o ruído eletromagnético produzido pelo motor ensaiado e piora significativamente as características elétricas do motor. Por outro lado, a introdução do anel intermédio no rotor 2 diminui de forma menos significativa o ruído eletromagnético; no entanto, as características elétricas não são tão prejudicadas e a curva de binário sofre uma melhoria em relação ao rotor com apenas barras direitas (rotor 2).

O uso em simultâneo das barras inclinadas e do anel intermédio aparentemente resulta num rotor com a menor produção de ruído eletromagnético de todos os casos ensaiados; no entanto é também o motor com as piores características elétricas e com uma curva de binário com valores reduzidos, comparando com as demais soluções. Apesar das características elétricas para o rotor que acumula estas duas soluções serem as piores que foram registadas nos ensaios realizados, estas são bastantes semelhantes às do rotor utilizado atualmente como solução industrial.

Dos resultados obtidos através dos ensaios laboratoriais é possível concluir que a discussão sobre a utilização de diferentes rotores para diferentes aplicações dos motores de indução não é absurda, muito pelo contrário apresenta alguns pontos bastante relevantes. Exemplificando: caso o motor seja utilizado num ambiente industrial, ruidoso por natureza, considerar a utilização de motores com rotores parecidos ao rotor 3 ou mesmo ao rotor 2 (tendo em atenção a curva de carga), pode trazer benefícios em termos de consumo de energia, uma vez que os motores com estes rotores aparentam ter um rendimento mais elevado do que soluções utilizadas atualmente. Por outro lado, caso o motor tenha como objetivo ser aplicado numa área residencial, conjecturar a utilização de um motor com um rotor do tipo rotor 4 poderá ser uma opção que se adegue mais à aplicação desse motor. No entanto, a utilização do rotor 1 atende de forma geral praticamente a todas as aplicações.

Por fim é necessário notar que os resultados obtidos são válidos apenas para os motores de dimensão semelhante ao motor escolhido na secção 3.1, não sendo possível afirmar, baseado nos dados recolhidos, que os efeitos se repercutem em motores de outras dimensões. Ensaio adicionais permitiriam um conhecimento mais profundo da distribuição das perdas, no entanto os ensaios já realizados permitem ter segurança nos resultados obtidos. A coerência dos resultados é um bom indicativo de que os protótipos não têm nenhum defeito de fabrico, mas caso se pretenda eliminar de forma definitiva esta suspeita seria necessário produzir e ensaiar mais rotores de cada um dos tipos considerados nesta dissertação.

6.2. Propostas para Trabalhos Futuros

Relativamente às simulações numéricas seria relevante repetir aquelas que foram apresentadas nesta dissertação considerando as elevações de temperatura registadas nos ensaios. Também seria vantajoso repetir as simulações numéricas referentes ao rotor 3 e ao rotor 4 (já com as temperaturas obtidas nos ensaios), com o objetivo de verificar se estas seriam validadas pelos ensaios laboratoriais.

Executar um estudo mais profundo sobre o dimensionamento do anel intermédio seria relevante, verificando, através de simulações numéricas e ensaios laboratoriais quais as dimensões ideais para um anel intermédio.

Realizar a repetição dos ensaios e construir mais protótipos dos rotores 1, 2, 3 e 4 seria interessante uma vez que, caso os resultados se repetissem, serviriam para confirmar os resultados obtidos e assim afirmar com maior certeza os efeitos verificados.

A realização de ensaios cujo objetivo é avaliar diretamente as componentes das perdas suplementares (ensaio Eh-Star) também seria importante, uma vez que permitiria uma maior compreensão da distribuição das perdas e dos fenómenos provocados pela inclinação das barras e pela introdução do anel intermédio.

Finalmente, desenvolver um trabalho semelhante ao que foi executado nesta dissertação para motores de outras dimensões possibilitaria o conhecimento mais pormenorizado da influência que a introdução do anel intermédio e a inclinação das barras provocariam no desempenho desses motores.

Referências

- [1] S. L. Nau, "The influence of the skewed rotor slots on the magnetic noise of three-phase induction motors," 1997 Eighth International Conference on Electrical Machines and Drives (Conf. Publ. No. 444), Cambridge, 1997, pp. 396-399.
- [2] Ferková, Želmíra & Kindl, Vladimír. (2017). "Influence of Skewed Squirrel Cage Rotor with Intermediate Ring on Magnetic Field of Air Gap in Induction Machine". *Elektronika ir Elektrotechnika*. 23. 10.5755/j01.eie.23.1.17580.
- [3] M. G. Say (1936) The Performance and Design of Alternating Current Machines. London: Sir Issac Pitman & Sons, Ltd.
- [4] WEG (2017) W22 Motor Elétrico Trifásico - Catálogo Técnico Mercado Brasileiro.
- [5] Siemens (2013) Introducing a brand new series of Super Performers.
- [6] H. De Gersem, K. Hameyer, T. Weiland, "Skew interface conditions in 2-D finite element machine models", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 39, no. 3, pp. 1452-1455, May 2003.
- [7] D. Strbac and R. Gottkehasch, "Improvement of the operating behavior of small induction motors by finding an optimal rotor skewing angle and a harmonic distribution of the number" in *Proc. ETG/GMM-Symp. Innov. Small Drives Micro-Motor Syst. (IKMT)*, Cologne, Germany, Sep. 2015, pp. 1-7.
- [8] Dorrell, David & Miller, T.J.E. & Rasmussen, C.B. (2003). "Inter-bar currents in induction machines", *IEEE Transactions on Industry Applications*. 39. 677 - 684. 10.1109/TIA.2003.810643.
- [9] C. I. McClay and S. Williamson, "The variation of cage motor losses with skew," *Conference Record of 1998 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Third IAS Annual Meeting (Cat. No.98CH36242)*, St. Louis, MO, USA, 1998, pp. 79-86 vol.1.
- [10] A. Odok, "Stray load losses and stray torques in induction machines", *Trans. AIEE*, vol. 77, no.4, pp.43-53, 1958.
- [11] Wei Xu, Xiaohua Bao, Chong Di, Lang Wang, Yuanyang Chen, "Optimal Angle Combination for Improving Electromagnetic Torque in Induction Motor with Double-Skewed Rotor", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 53, no. 11, May 2017.

- [12] E. Johnson, C. (1932). Rotor for Silent Motors. US 1,861,059.
- [13] Lund, H. (1936). Induction Motor. US 2,047,831.
- [14] Klíma, V. (1950). Squirrel-Cage Armature of Induction Motor With Bridge Resistance. US 2,528,960.
- [15] Alger, P. L. (1960). Intermediate Ring Squirrel Cage Rotor. US 2,944,171.
- [16] Manuel Vaz Guedes (1999/2000) 'Motor de Indução Trifásico - Energia de Deslizamento'. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [17] WEG (2018) <https://www.weg.net/institutional/BR/pt/>
- [18] Rylander, T. (2013), *Computational Electromagnetics*, Texts in Applied Mathematics, New York: Springer Science+Business Media
- [19] K. Yamazaki and Y. Watanabe, "Interbar current analysis of induction motors using 3-D finite-element method considering lamination of rotor core," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 42, no. 4, pp. 1287-1290, April 2006.
- [20] Englebretson, S.C. (2009) (PhD Dissertation). Induction Machine Stray Loss from Inter-bar Currents. Massachusetts Institute of Technolog
- [21] Alger, P.L., The Nature of Induction Machines, Gordon and Breach, New York, 1965.
- [22] Silva, Hilton Penha, Fundamentos de Acústica, Departamento de Pesquisa e Inovação Tecnológica - WEG Equipamentos Elétricos S/A - Motores, Jaraguá do Sul, 2011

Anexo A - Ensaio de Ruído

Este anexo é constituído por toda a informação adicional e mais pormenorizada sobre o ensaio de ruído realizado no âmbito desta dissertação. O ensaio foi realizado dentro de uma câmara acústica cujo ruído de fundo era de 23,83 dB.

As posições em que o ruído foi medido estão indicadas na fig. A.1. A figura não se encontra desenhada à escala e, portanto, a distância dos pontos ao motor não é proporcional ao objeto que corresponde ao motor. Considerando o chão da câmara acústica como o plano xy, todos os pontos distam 1 metro do motor no plano xy e estão localizados a uma altura equivalente à metade da soma da altura do motor com 1 metro. A posição 1 diz respeito ao ponto de medição localizado no lado da caixa de ligações, a posição 2 diz respeito ao ponto de medição localizado na parte traseira do motor (mais perto do ventilador) e a posição 3 diz respeito ao ponto de medição localizado no lado do motor oposto à caixa de ligações.

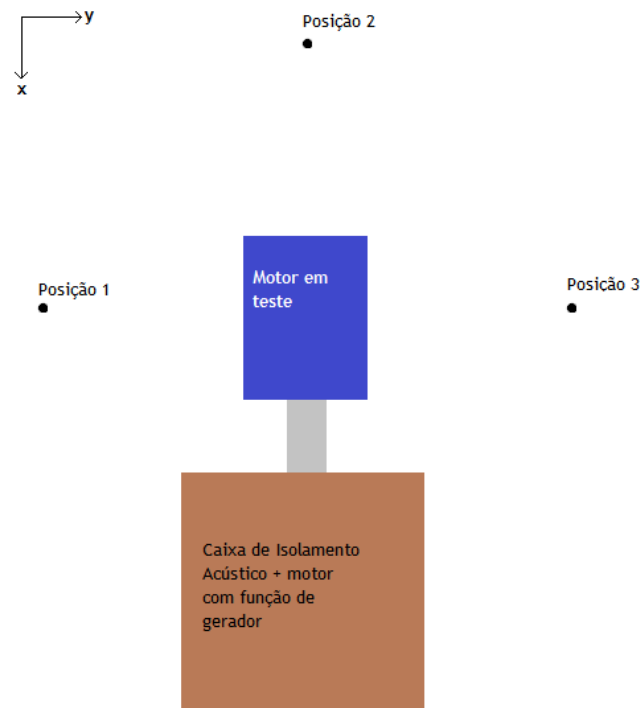


Figura A.1 - Esquema do ensaio laboratorial de ruído

Relativamente à posição 2 era esperado que o ruído captado fosse mais elevado do que nos demais pontos, devido à maior proximidade do ventilador. Uma vez que o ruído captado nesta posição é influenciado de uma forma mais significativa pelo ruído mecânico, este ponto poderia ser excluído do cálculo da média, uma vez que o maior interesse é a medição do ruído com origem eletromagnética. No entanto, o aumento do ruído na posição 2 em comparação com as demais medições é reduzido. No entanto, na tabela A.1 e na tabela A.2 é apresentada uma comparação entre o valor das médias do ruído e o ruído eletromagnético, considerando as situações em que se considera todas as medições e a situação em que se exclui a posição 2.

Os valores médios das 3 posições em todos os casos ficaram maiores do que as médias das medições das duas posições laterais do motor (posição 1 e 3), reduzindo também a pressão sonora de origem eletromagnética. No entanto, o resultado da análise comparativa entre os rotores não variara.

Tabela A.1 - Médias do ruído produzido pelo motor durante o ensaio

Ensaio		Média (3 posições)	Média (2 posições)
Rotor 1	off	56.90	56.85
	on	58.66	58.30
Rotor 2	off	57.11	56.90
	on	62.81	62.65
Rotor 3	off	57.07	56.95
	on	60.61	60.45
Rotor 4	off	58.15	57.90
	on	58.90	58.80

Tabela A.2 - Ruído com origem eletromagnética produzido pelo motor com os diferentes rotores

Ensaio	Pressão Sonora (dBA) (3 Posições)	Pressão Sonora (dBA) (2 Posições)
Rotor 1	53.89	52.85
Rotor 2	61.44	61.31
Rotor 3	58.06	57.88
Rotor 4	50.94	51.52

Sendo que o objetivo final do ensaio de ruído é fazer uma comparação entre os valores de ruído obtidos para os diferentes rotores é importante garantir o mesmo fator de carga no motor de ensaio no momento da medição de ruído. Para isso foi controlada a corrente estatórica por fase que o motor em ensaio estava a absorver. Os valores das correntes no momento da medição do ruído estão expressos na tabela A.3.

Tabela A.3 - Corrente estatórica por fase no ensaio de ruído

Rotores I (A)	
Rotor 1	11.69
Rotor 2	11.7
Rotor 3	11.72
Rotor 4	11.71

Anexo B - Ensaio de Vibração

Este anexo é constituído por toda a informação adicional e mais pormenorizada sobre o ensaio de vibração realizado no âmbito desta dissertação. Apesar de os resultados do ensaio não terem sido conclusivos, pois o nível de vibração do motor era muito baixo, é relevante indicar em que condições foram recolhidas as medições.

Para cada rotor foram recolhidas 4 medições. Duas das medições foram recolhidas com o motor em ensaio desligado e acoplado ao gerador (motor utilizado como gerador) ligado. As outras duas medições foram recolhidas com o motor em ensaio acoplado com o gerador, no entanto, com as duas máquinas ligadas. Os dois pontos de medição para cada uma das condições são: na dianteira do motor na direção horizontal (fig. B.1); na dianteira do motor na direção vertical (fig. B.2).

As condições de alimentação do motor em ensaio, quando existentes, estão expressas na tabela B.1. O controlo do motor em ensaio foi realizado recorrendo ao controlo da corrente estatórica por fase, garantindo um fator de carga semelhante em todos os ensaios realizados.

Todos os dados recolhidos neste ensaio estão expressos na tabela 5.2.

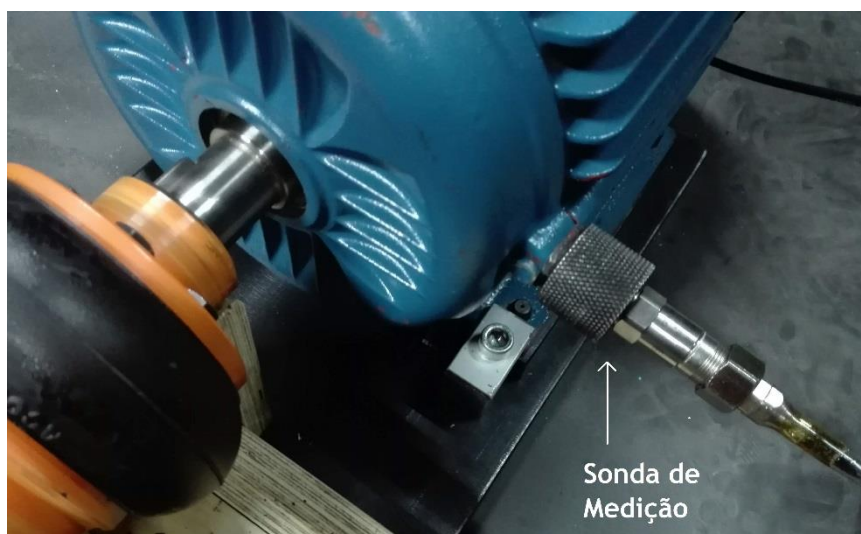


Figura B.1 - Posição da sonda no ponto referido como 'horizontal' [Fonte: Autor]

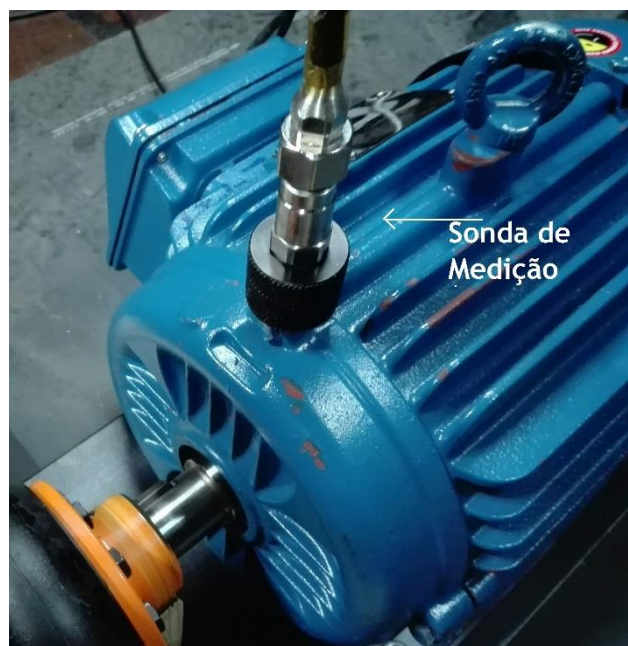


Figura B.2 - Posição da sonda no ponto referido como 'vertical' [Fonte: Autor]

Tabela B.1 - Corrente estatórica por fase no ensaio de Vibração

Rotores	I (A)
Rotor 1	11.69
Rotor 2	11.70
Rotor 3	11.72
Rotor 4	11.71